

静态破碎剂的研制及应用

专 业：材料学

硕 士 生：孙立新

指导老师：何廷树 教授

摘 要

静态破碎剂是一种利用材料膨胀力达到破碎切割脆性介质的新材料，可广泛应用于岩石和混凝土破碎，以及石材及各种贵重脆性材料的切割和开采中。具有无冲击波、无震动、无飞石、无噪音及无有害气体危害。

作者在对静态破碎剂作用机理详细分析讨论的基础上，选用生石灰作为主要膨胀物质，并辅以相关辅料，通过正交试验，对静态破碎剂的配方进行了系统的优化研究。开发出了一种以生石灰为主要成分的静态破碎剂，并依据相关标准，对所开发静态破碎剂的性能进行了全面检测。

试验研究及检测结果表明，所开发的静态破碎剂反应速度快，膨胀压力大，耐久性好。本文还将该静态破碎剂应用于混凝土及岩石的静态破碎。实际工程应用情况表明：该静态破碎剂的各项性能指标均达到施工设计要求，效果良好。

关键词：静态破碎剂； 静态爆破； 拆除； 膨胀压力

Study on the Static Cracking Agent and Its application

Specialty: Science of Materials

Name: Sun Lixin

Instructor: Professor He Tingshu

ABSTRACT

The static cracking agent(SCA) is a new kind of cracking material using expansive pressure to cut or crack concrete, rock and other precious brittle solid materials .SCA has many advantages in application process, which includes no blasting wave, no quake, no flying stone, no noises and no poisonous gas etc.

In this paper, based on the detailed analyses of the action mechanism of SCA, by selecting quicklime as main expansive substance and adding several accessory ingredients, the proportion of SCA was systematically investigated and optimized through perpendicular experiments. Then, a type of SCA based on quicklime as main expansive substance was developed; in the meantime, its performances were carefully tested in accordance with the relative standards.

The experimental and testing results show that the developed SCA has a fast reaction velocity, a big expansive pressure strength and good weather resistance. The developed SCA has been applied to the static cracking projects of concrete and rock. The application results in practice indicate that the performances of the SCA meet the demands of constructing design; and the static cracking effects was excellent.

Keywords: static cracking agent, static cracking, demolition, expansive pressure

声 明

本人郑重声明我所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：孙立科

日期：2005.5

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存论文。

（保密的论文在论文解密后应遵守此规定）

论文作者签名：孙立科 导师签名：何廷林 日期：2005.5

注：请将此页附在论文首页。

1 绪 论

1.1 静态破碎剂的概述

近年来,随着工业,交通和城市建设的飞速发展,拆除工程量急剧增加,迫切需要发展一种破碎效率高,施工安全,没有环境污染的破碎方法及其所用的破碎剂,这种新的破碎技术已经引起人们的关注和重视,许多国家都在积极开展静态破碎剂理论及应用方面的研究和开发。

静态破碎剂(static cracking agent 常缩写为 SCA)属于非燃、非爆、无毒物品,是一种含有铝、镁、钙、铁、氧、硅、钛等元素的物质,用适量水调成流动浆体,直接装入炮孔中,经水化后,产生巨大膨胀压力(可达 30~50MPa),并施加给孔壁。将混凝土构筑物或岩石悄悄地破碎。

静态破碎剂的主要成分是氧化钙,氧化钙与水反应生成氢氧化钙是静态破碎剂产生膨胀压力的来源。氧化钙价格便宜,材料来源丰富。所以合理地使用静态破碎剂,可以获得非常显著的技术经济效益。

(1) 节约能源,节省投资。机械法和电气法都需要电力消耗,我国的能源供应紧张,节约电力具有非常重要的社会意义,而且静态破碎剂的价格也比较便宜。

(2) 改善施工条件,减轻劳动强度,实现文明施工。破碎过程安全,不存在爆破震动,空气冲击波、飞石、噪音、有毒气体和粉尘等危害,而且施工简单,破碎剂用水拌和后注入炮孔即可,不需要堵塞炮孔便可达到目的。

(3) 加快建设速度,提高工程进度。静态破碎法可按要求设计适当的孔径,孔距,和孔的角度来达到有计划地分裂,切割岩石和混凝土的目的。

(4) 静态破碎剂不属于危险品。在购买、运输、保管和使用上,可不经公安部门审批,不象使用炸药那样受到种种限制,尤其是在城市中使用更为方便。

1.2 静态破碎剂的作用原理

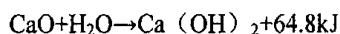
1.2.1 引言

静态破碎剂产生膨胀力的作用过程是一个化学反应过程,因此,研究静态破碎剂首先要从研究其化学反应过程入手。运用热力学方法对其主要反应进行研究,可以得出反应进行的方向及其反应平衡常数;静态破碎剂膨胀压力的产生是由于其反应后体积增大所引起的。研究反应过程的物质转移及反应前后体积的变化,可以得到静态破碎剂的膨胀机理及其产生体积膨胀的条件,进一步指导静态破碎剂膨胀压力提高的研究。

另外，静态破碎剂的反应过程是一个放热过程，反应一旦开始，热量将不断增加。当热量的散失小于所产生的热量时，反应温度将升高，反应速度不断加快，将有可能导致冲孔现象的发生。而随着反应的进行，温度逐渐下降，但膨胀压力仍持续增长，而且静态破碎剂受环境温度影响非常大，在冬季寒冷季节反应缓慢，有时会失去作用；而在夏季高温时又易产生冲孔。因此，研究其反应放热，对提高静态破碎剂的反应速度及防止冲孔现象的发生具有重要意义

1.2.2 静态破碎剂的基本化学反应式

目前，静态破碎剂的主要成分都是氧化钙。氧化钙和水反应生成氢氧化钙，在放出热量的同时，其体积增大。静态破碎剂正是利用这种化学反应和氢氧化钙结晶发育时所产生的膨胀压力来破坏岩石和混凝土等脆性材料。其基本的化学反应式如下：



从式中可以看出，这是一个放热反应。

1.2.3 反应的物质转移

氧化钙和水混合后，立即发生两类物质的转移过程。一是水分子进入 CaO 粒子内部，并与之发生水化反应；二是水化反应产物向原来充水空间转移。如果前者与后者相适应，即水化速度和水化产物的转移速度相等时，CaO—水系统的体积不会发生膨胀，但是，由于 CaO 的结构特性，即内比表面积大，水化速度很快，水化速度大于水化产物的转移速度，这时，由于 CaO 粒子周围的反应产物还没有转移走，而里面的反应又大量的产生了，这些新的反应物将冲破原来的反应层，使粒子产生机械跳跃，因而发生体积膨胀，产生膨胀压力，将约束介质破坏。在没有约束条件下，氧化钙将散裂成粉末。

1.2.4 反应前后体积的变化

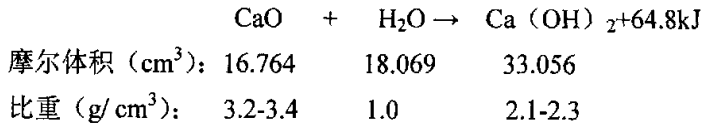
静态破碎剂膨胀压力的产生是由于其反应后体积增大所引起的。CaO 和水反应时，生成 Ca(OH)₂ 的固相体积在一定的条件下要比 CaO 的固体相体积增大 97.92%。固相体积增大，固相体积和空隙体积增量之和超过 CaO—水系统的空间，从而引起 CaO 体积的增大，膨胀压力增大。

生石灰的水化反应在没有约束的自由膨胀状态下，其体积将增大 2-3 倍。在有约束的条件下，其膨胀体积变小。当约束力非常大时，其体积没有变化，即不产生膨胀，这就是在实际应用常出现的静态破碎剂装入炮孔后失去作用的情况。为什么会出现这种情况呢？首先从反应物和生成物的摩尔体积变化来讨论。

静态破碎剂主要是利用生石灰的水化反应，但从其标准状况的反应物的摩尔体

积和生成物的摩尔体积进行比较可以看出，并不是在所有的情况下，都会产生体积膨胀。下面具体讨论什么情况发生体积膨胀。

下列反应式给出了反应物、生成物的摩尔体积和比重等数据。



从上面所列数据来看,生成物的摩尔体积为 33.065 cm³,而反应物的摩尔体积为 16.764+18.069=34.833 cm³,反应之后体积应该变小,而不是增大。这好象与实际情况相矛盾。这是由于摩尔体积为分子最紧密堆积时的体积,而在静态破碎剂中实际应用的是其表观体积,也就是说在一般情况下,静态破碎剂中生石灰的水化反应的生成物很难达到分子状态的最紧密堆积,因为在缺水状态下,生成的氢氧化钙比表面积非常大,不是最紧密堆积状态,因此,就表现出体积膨胀。相反,在大量水存在时,如在水溶液中,氧化钙与水反应生成氢氧化钙,其体积变小,而不产生膨胀力。

一般缺水情况下,(干态,不是在水溶液中),是用容重来衡量氧化钙和氢氧化钙,而不是用比重。生石灰是由碳酸钙煅烧而成,由于 CO₂ 的逸出,产生了许多微孔,氧化钙保持了碳酸钙的假象,其容重略大于 1,与其 3.2-3.4 的比重相差甚远。氢氧化钙在干粉状态下,容重也很小。仅为 1 左右。这样生石灰的水化反应中(缺水状态)就表现出体积增大的现象。

当外界约束力非常大时,迫使生成的氢氧化钙的容重接近其比重,所产生的体积也就越来越小,甚至不产生膨胀。

1.2.5 反应放热

静态破碎剂的主要反应是放热反应,其放出的热量的大小随温度而变化,如表 1-1。

表 1-1 氧化钙与水反应的放热效应

温度 (K)	ΔH_{r}^0 (千焦/摩尔)			放出的热量 Q (千焦/摩尔)
	反应物		生成物	
	CaO	H ₂ O	Ca(OH) ₂	
298.15	-635.090	-285.830	-986.085	65.165
400	-634.723	-242.835	-985.169	107.611
500	-634.390	-243.821	-983.893	105.682
600	-634.107	-244.752	-982.470	103.611
700	-633.915	-245.630	-981.027	101.482

当温度小于 100℃时，温度升高放出的热量增加；当温度超过 100℃时，氧化钙与水蒸气发生反应放出更多的热量；当温度进一步升高时，放出的热量逐渐减小。由此可看出，反应一旦开始，热量将不断增加；当热量的散失小于所产生的热量时，反应温度将升高，反应速度不断加快，将有可能导致冲孔现象的发生^[13]。从表中也可以看出，静态破碎剂受环境温度的影响非常大，在冬天寒冷季节反应缓慢，有时甚至会失去作用；而在夏季高温时又易产生冲孔。

1.2.6 讨论与分析

通过以上运用热力学方法对静态破碎剂主要反应的简单分析，可以得出下面的结论：

- (1) 如果要增加膨胀压力，就需要提高氢氧化钙的容重，同时减少水灰比，使静态破碎剂的膨胀压增加；
- (2) 如果要提高反应速度，就需要增加反应物的活性或提高反应温度；
- (3) 为防止冲孔现象的发生，就需要添加能强烈吸收水蒸气又能在以后的反应中将水释放出来的物质。

以上三条结论，就是我们设计静态破碎剂研制方案时遵循的原则。

1.3 静态破碎剂膨胀性能的理论分析及配制方法

1.3.1 静态破碎剂膨胀性能的理论分析

静态破碎剂是一种高膨胀性粉状或颗粒状物料，加水混合，填充在被破碎介质的钻孔中，随着水化反应的进行，膨胀与硬化同时发生，在一定时间内可以产生较大的膨胀压力，对孔壁施加的膨胀力使得破碎体内部所受拉力远大于其抗拉强度时被破碎物体开裂、破碎。由于破碎所用的静态破碎剂水化反应慢，压力能均匀地传递给外界被破碎体，所以破碎进行的平静无声，由于反应过程中不产生有毒物质，且在局部范围内进行，因此它是一种安全，无公害的破碎方法，适用于城镇，厂矿改扩建的建筑物拆除，石材切割，巷道开拓掘进，局部破碎及其它破碎工艺。

下面是孔间受力的理论分析：在某一弹性体上有两个受内压作用圆孔，因为静态破碎剂作用过程可以看作是一静态过程，所以两孔作用效果可以看作是各自在弹性体上作用效果的叠加^[7]，即

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = -[r_1^2/r^2 q_1(t) + r_2^2/(l-r)^2 q_2(t)] \quad (1-1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2} = -r_1^2/r^2 q_1(t) + r_2^2/(l-r)^2 q_2(t)$$

则
$$\sigma = |\sigma_r - \sigma_\theta| = 2r_1^2/r^2 q_1(t) + 2r_2^2/(l-r)^2 q_2(t) \quad (1-2)$$

通过求极值可得相应应力为：

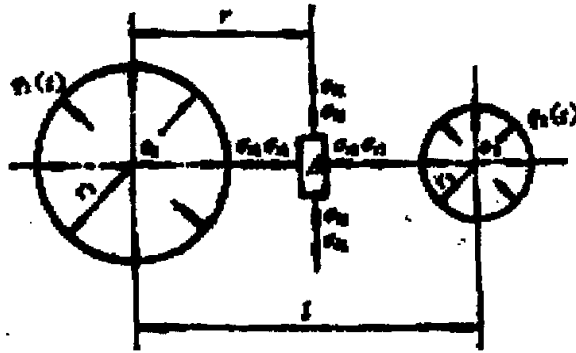


图 1.1 弹性体受力控制分析

$$\sigma = 2r_1^2/l^2q_1(t)[1+(r_2^2q_2(t)/r_1^2q_1(t))^{1/3}]^2 + 2r_2^2/[(r_2^2q_2(t)/r_1^2q_1(t))^{1/3}]^2[1+(r_2^2q_2(t)/r_1^2q_1(t))^{1/3}]^2 \quad (1-3)$$

左边界点 $r=r_1$ 时， 则

$$\sigma_* = 2q_1(t) + 2r_2^2/(l-r_1)^2q_2(t) \quad (1-4)$$

右边界点 $r=r_2$ 时， 则

$$\sigma_* = 2q_2(t) + 2r_1^2/(l-r_2)^2q_1(t) \quad (1-5)$$

则在 O_1, O_2 两炮孔连线上的应力最小值为 $\sigma_{\min} = \min\{\sigma, \sigma_{\text{左}}, \sigma_{\text{右}}\}$

在实际工程中，通常采用同一孔径，同一 SCA 药剂，同时装药，也就是说在任何时刻，两炮孔参数及作用效果是一致的^[24]，即当 $r=r_1=r_2, q=q_1=q_2$ 时有

$$\sigma_{\min} = \min\{8r^2q/(l+2r)^2, 2q+2r^2q/(l-r)^2, 2q+2r^2q/(l-r)^2\} = 8r^2q/(l+2r)^2 \quad (1-6)$$

由第三强度理论知道，要想破碎介质，必须满足式 $\sigma_{\min} \geq [\sigma]$ ，即

$$8r^2q/(l+2r)^2 \geq [\sigma] \quad (1-7)$$

或
$$q \geq (l+2r)^2/8r^2 \quad (1-8)$$

式中， $[\sigma]$ 被破碎介质的极限抗拉强度^[27]。

1.3.2 静态破碎剂的配制方法

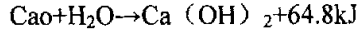
静态破碎剂一般是由水合膨胀性物质，水合延缓剂，水硬性物质和减水剂等组成。

(1) 水合膨胀性物质

水合膨胀性物质的用量不少于 50%。可用的膨胀性物质有氧化钙，氧化镁等，氧化钙来源丰富，易得，价格低廉。现在一般采用氧化钙。氧化钙可从石灰石煅烧

制成的生石灰获得，也可从煅烧白云石获得。挑选高质量的石灰石，控制适当的煅烧温度和时间，可以获得高含量的生石灰^[10]。

氧化钙在破碎剂中的作用原理：



它与水反应生成氢氧化钙固体后，放出热量，同时发生体积膨胀，产生膨胀压力。当处于被破碎物体的封闭的装料孔中时，固体牢固地挤压在孔料中，对孔壁做功，使物体破碎。从热力学分析，氧化钙和水很易反应完全，反应速度很快。实际使用中易出现以下两个问题：

一个是采用破碎剂浆体施工时，在破碎剂与水搅拌混合过程中，就有一部分氧化钙与水反应，这样就损失掉了一些膨胀做功的能量，降低了破碎效果。

另一个是将破碎剂浆体灌入料孔后，由于反应迅速，积聚大量热能。温度可上升到 100℃ 以上，使尚未反应的水大量气化，物料容易喷射出来，伤害施工者的眼睛和头部。因此必须加入其它物质，延缓水合反应^[11]。

(2) 水合延缓剂

一般采用的水合延缓剂有碳酸钠，碳酸氢钠，硫酸钙等无机盐，还有多元醇类，羧酸和羟基羧酸及其盐类。可以单独使用，也可几种并用。所以加入的延缓剂，最好是既能抑制氧化钙与水相混的初期反应速度，而在破碎剂硬结之后，又能使水合反应快速进行。这样，既能防止喷射现象，又能尽快达到最大膨胀压。但在实际应用中，仍不能符合使用要求，故需加入下面一些物质^[2]。

(3) 水硬性物质

常用的水硬性物质有硅酸盐水泥，高铝水泥或速凝水泥等。水硬性物质在破碎剂中，可较好地调节氢氧化钙的硬结速度，使它与水的水合反应同步，也就是使硬结速度与膨胀压的升高同步。这样，既起抑制喷射的作用，又不致过多地降低破碎剂的膨胀压

(4) 减水剂

实践表明：施工时，破碎剂与水应有适当的比例，一般约为 30%。如多于 30% 时，破碎剂浆体流动性好，便于施工装料，但会降低膨胀压，影响破碎效果，如加水量少于 20%，膨胀压可达到最大值，但破碎剂浆体流动性差，难以施工装料。加入一定量的减水剂，就可减少加水量，达到施工性能与破碎性能兼优的目的。

此外，为增大破碎剂的膨胀压，还可以加入膨胀增力剂等。

1.4 国内外静态破碎剂的研究应用现状

随着现代经济和社会基本建设的发展，城市建设迅速崛起，以有效利用城市土

地的观点出发,拆旧建新和改建工程将是建设的基本方针。由于这类工程往往是在人口密集,建筑物集中的地方进行,要求在施工过程中无噪声、无震动及无飞石等公害,不危及附近居民的安全。而传统的施工方法往往难以满足这种。在石材开采行业中,采用传统的炸药爆破方法,石材的开裂方向难以控制,切割面不整齐,并且具有隐性裂纹,成材率不高。另外,在一些特殊的施工场所,由于受到各种条件和原因的制约,不宜采用炸药爆破方法,如:矿山井下巷道施工及化工厂的施工其防爆要求高,不能采用炸药爆破的方法,由于炸药受到如此多的条件限制,人们期待使用一种无公害的破碎材料,在这种情况下,静态破碎剂应运而生。

1.4.1 国外静态破碎剂的研究应用现状

静态破碎剂的研制始于20世纪60年代。日本于六十年代末期,首创了静态破碎法,所用的破碎剂是静态膨胀破碎剂,这种破碎剂系由膨胀性物质,水硬性物质等组成。以浆体装入被破碎体的孔中,与水发生水合反应生成新的固体物质,产生体积膨胀,以放射状向周围扩展,当膨胀压超过被破碎物体的抗拉强度时,物体被破碎。

但是,静态爆破是1979年以后才开始出现的,不用炸药、雷管及其它任何引爆器材,而是将一种流动状的药液直接灌入炮孔,经过一段时间以后,就能无振动、无飞石、无烟尘、无声息地将混凝土、钢筋混凝土及岩石破坏的新技术。这种利用静的膨胀力来破坏物体的方法,乍看起来并不新颖,由于早期的膨胀剂的破碎能力及施工应用上存在了一系列未能解决的问题,故迟迟未予很好推广。即或国外有些工程也少量试验性地使用了一些,不是破坏力不强,效果不稳定,就是操作上难以控制,市场上更没有这类正式的商品出售。

直到1979年以后,以上这些问题才逐渐通过深入研究,有了新的突破。这年,日本的小野田公司,用新法研究成功了具有破坏力强、安全及施工简便的牌名为“Brista”的静态破碎剂,并于同年申请专利,正式生产,向国内外销售。由于这种新的药剂所具有的各种特性,较以往的膨胀剂有了显著的改善,并能破坏钢筋混凝土,为了与以往的膨胀剂有所区别,小野田公司的科技人员,才将其改称为“静态破碎剂”^[3]。这时,静态破碎剂才作为正式产品在日本问世。目前,国外从事该项研究的国家有日本、美国、俄罗斯、捷克、法国和瑞典等国,英国、西德等国也从1982年开始研究静态破碎剂,并取得一定的成就。

1.4.2 国内静态破碎剂的研究应用现状

20世纪80年代,铁道部工程局的科技人员从香港出版的新产品、新技术介绍一文中受到启发,开始对“静态爆破”进行研究。这一其间主要着重于对世界上刚出现的这项新技术的国外发展动态,进行情报调研和试验前的准备工作,并在武钢进行

了少量试验。由于收集的资料纯属消息广告，缺乏技术细节，进展甚微。

1981 年则另寻途径，根据日本“Brista”广告上介绍的基本原理，参照《胶凝物质工艺学》和一些膨胀性物质的制作方法，详细拟定了“静态破碎剂”试验方案。通过所进行的一系列试验，不断摸索改进，终于于该年 6 月在南京试验成功了类似日本“Brista”破碎剂的新药剂，由于药剂组份已事先固定，不可调节，从而对一般混凝土和岩石的破坏时间均在 24 小时以上，因时间较长，加之，储存时间短，易于受潮变质，结成硬块以及生产工序繁琐、成本高等缺点，所以研究成功不久，就必须另寻新的途径。

我国武汉工业大学、中国建材科学院等单位也先后在 80 年代研制成功，并大量生产投入市场。国内产品一般反应速度缓慢、膨胀压力偏低。90 年代初，四川建筑材料研究院等单位，虽然也研制静态爆破剂，但是其膨胀力不够，操作麻烦，难以推广。21 世纪以来，人们开始研制不同于以上标准的新的静态破碎剂，改善了静态破碎剂的各项性能。

1.5 静态破碎剂目前存在的问题和发展方向

1.5.1 静态破碎剂存在的问题

目前静态破碎剂在生产和应用中存在三个方面的问题，影响其生产与推广应用。一是反应速度缓慢，速度不易控制，一般需要较长时间才能开裂，受环境温度的影响大，夏季气温高时，最快也要几小时；特别是在冬天寒冷季节，作用更为缓慢，甚至失去作用，严重影响生产效率。普通静态破碎剂为解决环境温度对反应速度影响大的问题，一般制成夏季型、冬季型、和春秋型，这样就给施工及储存带来不方便。二是静态破碎剂的膨胀压力小，孔间距稍大就难以破碎。三是操作复杂，在夏季装药过程中易发生冲孔现象，不安全，给应用造成了一定的困难^[5]。

另外，国外快速静态破碎剂产品的价格高，国内生产的静态破碎剂虽然价格不高，但存在反应速度慢，膨胀压力小的特点。因此，需要进一步深入研究，以解决和克服上述缺点。

1.5.2 静态破碎剂的发展方向

随着城市建设的飞速发展和环境保护的日益严格要求，21 世纪以来，静态破碎剂受到各国的关注，各种文件的报道正在迅速增加，其发展前景是可以预期的。

首先，通过对原材料的深入研究，选择比较满意的组分，进行优化组合，降低生产成本，提高工作性能，静态破碎剂的性能可根据各种使用要求调节组分进行制造，并且通过研究改进性能。可望部分代替炸药爆破法。

其次，通过对以上的理论研究，可以使开发的产品更加功能化、原材料更加多样化、生产与使用环境生态化、应用技术标准化，则可以更好的满足市场需要。因此，静态破碎剂在我国具有广阔的发展前途。

1.6 本课题研究的目、意义及主要内容

1.6.1 本课题研究的目及意义

如前所述，静态破碎剂具有膨胀力小等一系列弱点。所以我们围绕着如何提高静态破碎剂的膨胀压力，人们进行了大量的研究。但时至今日，研究仍多是低水平重复，静态破碎剂的性能仍然未出现大的改观。总体研究效益差。尤其近几年来进展较慢。

本课题在前人研究的基础上，对静态破碎剂的各项主要成份的性质及其反应过程，作进一步的研究。在此基础上提出新型静态破碎剂的研制方案。通过试验研制新型的静态破碎剂，并对其主要性能进行测试。通过试验研制出的新型静态破碎剂，应具有以下优点：与某些其它产品相比，膨胀压力大，大大提高其破碎能力；反应速度快，一般为几小时，缩短其破碎的等待时间；耐候性好，不在分为夏季型、冬季型及春秋型；研制出的静态破碎剂应施工简单，操作方便，使用安全，不发生冲孔现象。

膨胀压力是衡量静态破碎剂性能的一项重要指标。因此，膨胀压力的测试不仅能判断静态破碎剂产品性能的优劣，而且对静态破碎剂的研制具有重要意义。目前普遍采用的是电阻应变片侧压系统，无论从测试的正准确性、可靠性，还是从系统的实用性来看，都存在很大的局限性。所以，本试验对侧压系统进行系统研究，采用液压测压仪系统，该系统不仅使用方便，操作简单，而且测试结果准确可靠，具有很大的优越性。

此外，除了对研制出的新型静态破碎剂进行膨胀压力测试，还应对其进行反应速度、耐候性能、岩石和混凝土开裂试验，以及与市场出售的普通静态破碎剂的对比试验，以进一步检验其性能。对于研制及试验过程中出现的问题，作出必要的分析，为后续研究做好铺垫。

1.6.2 本课题研究的主要内容

- (1) 进一步优化传统静态破碎剂的基本配方，找出最佳组分的配比。
- (2) 选择并加入合适的一种或几种添加剂，以提高静态破碎剂的膨胀压力。
- (3) 根据相关标准综合测试产品性能。
- (4) 通过了解静态破碎剂的性能、施工方法、施工流程、具体操作过程等，检验所开发的静态破碎剂在混凝土拆除、石方工程中的应用。

2 静态破碎剂基本配比的优化研究

2.1 静态破碎剂的配制方法

根据前面的分析研究表明,影响静态破碎剂(SCA)性能的因素很多,本文将众多的因素分成几个组成部分。分析和研究静态破碎剂的主要成分和辅助成分的物理化学性质。通过正交试验研究每一部分的最佳组合配比,并在此基础上进行静态破碎剂各部分之间的最佳配方的研制,这就可以很方便地弄清 SCA 产生膨胀压机理,以及影响静态破碎剂膨胀压的因素,喷出的原因及反应速度等问题。

2.1.1 膨胀压的影响因素分析

SCA 水化后,经一段时间凝结成一定强度的固体,这种固体物质在炮孔中完全凝结时,可以近似地看成一个弹性体。SCA 的膨胀压力就是由于这个弹性柱体的体积膨胀与热膨胀之和大于钻孔的体积而产生的,它们之间的作用过程可以看作是平面应变轴对称问题,根据弹性力学分析可得:

$$q=[\alpha\Delta T+(1+\eta)^{1/2}-1]E_1E_2/[(1+\mu_2)(1-\mu_1)+(1+\mu_2)E_1]$$

式中: E_1 、 E_2 ——SCA 柱体和被破碎介质的弹性模量, Pa;

μ_1 、 μ_2 ——SCA 柱体和被破碎介质的泊松比;

α ——SCA 柱体的线膨胀率;

η ——SCA 生成物的体积膨胀率;

ΔT ——温度变化, K。

通过对上式分析可知,孔压 q 是 E_1 、 μ_1 、 α 、 η 及 ΔT 的单调函数,理论上 E_1 、 μ_1 、 α 、 η 及 ΔT 越大,产生的孔压越大。

通过以上分析,选择 SCA 原料的原则是:反应后体积膨胀率要大,反应热要高,线膨胀系数要大,在其反应凝固后其弹性模量数值及泊松比要大。

2.1.2 静态破碎剂基本原料及辅助成分的性能分析

作为要研制的静态破碎剂的基本原料是不同粒度级配的石灰混合物,它具备前面提到的作为 SCA 原料的基本性能特征,下面以微观分析及宏观实测对其性能进行研究。

基本原料氧化钙在水的作用下,产生下列反应,同时产生体积膨胀和放出大量热量。



从水化过程中物质转移的观点来分析,当石灰与水拌和后,立即发生两类物质的转移过程。一是水分子(或氢氧根离子)进入石灰粒子内部,并与之发生水化反应,生成水化产物;二是水化产物向原来充水空间转移。如果前者与后者相适应,即水化速度与水化产物转移速度相适应时,石灰—水系统的体积不会发生膨胀,但是,由于石灰的结构特性,即内比表面积大,水化速度很快,常常是水化速度大于水化产物转移速度,这时,由于石灰粒子周围的反应产物还没有转移走,而里面的反应产物又大量地产生了,这些新的反应产物将冲破原来的反应层,使粒子产生机械跳跃,因而使试件膨胀和开裂。按照这种观点,石灰和水拌和后,产生体积增大的原因,是反应产物的转移速度大大小于水化速度。

从孔隙体积增量的观点来分析,石灰水化过程中,在固相增加的同时,要引起孔隙体积的增加,从而产生体积的膨胀。这里所指的固相体积增加包括两个因素,一个因素是指氧化钙和水反应,生成氢氧化钙的固相体积比氧化钙的固相体积增大97.92%;另一个因素是指石灰在水化过程中,石灰粒子分散,比表面积增大,这时,在分散粒子的表面上吸附水分子,由于被吸附的水分子具有某种固体的物质,因此,把这种被吸附的水分子也看作固相体积的增加。

那么,固相体积为什么会引起孔隙体积增加,假定石灰粒子水化前后均为球形粒子,水化过程中按理想的紧密六角形堆放,显然其固相粒子体积为总体积的74%,固相粒子间的孔隙为总体积的26%,它们的相对含量是保持不变的,而且与粒子的直径无关。然而孔隙体积的绝对值却随固相体积的改变而改变。所以当石灰水化时,固相体积增大,必然会引起孔隙的增大,固相体积和孔隙增量之和就可能超过石灰—水系统的空间,从而引起石灰浆体的体积的增大。

以上两种分析,从不同角度阐明了石灰水化时体积显著增加的机理,前者从水化动力学的观点,说明了引起体积增加的“力”,后者从“量”的观点,说明了石灰体积增大的原因。

通过微观分析知道每个氧化钙分子的体积为 27.829\AA^3 ,而每个 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分子体积为 54.4766\AA^3 ,反应后体积分子近一倍。不仅如此,在每个体积增加的同时,分子间的空隙也增加了。经充分水化后的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的体积在自由膨胀条件下增加了2~4倍。在约束条件下,原料水化反应的膨胀压力与增长基本上是在几分钟内完成的,且成直线增长。其膨胀压力远大于30MPa,当压力达到一定值时,如堵塞不良,易出现喷孔。因为其反应速度迅速,积聚大量热能,温度可以上声到 100°C 以上,使尚未发生反应的水大量汽化。这就达不到破碎的作用。所以,我们必须采取一定措施,推迟压力到来的时间及防止其喷孔。

2.1.2.1 延缓剂及其作用原理

延缓剂是能在不过多降低膨胀压力的前提下,延缓生石灰的水化反应速度,

进而实现压力均匀，慢速增长。本文选择出的延缓剂为糖类或醇类。

醇类延缓剂的作用机理是，其缓凝作用在于羟基吸附在水泥颗粒表面与水化产物表面上的 O^2 形成氢键，同时，其他羟基又与水分子通过氢键缔合，同样使水泥颗粒表面形成了一层稳定的溶剂化水膜，从而抑制水泥的水化进程。单糖、低聚糖等均具有较强的缓凝作用。本试验选用蔗糖作为减水剂。

2.1.2.2 胶结增强剂

胶结增强剂是通过水化反应后，与生石灰胶结在一起。本研究所采用的胶结增强剂是粉煤灰、水泥类的固体物料。

SCA 料浆中主要的胶凝物质是各种硅酸钙 ($0.66 \sim 0.24CaO \cdot SiO_2$ ($0.3 \sim 0.4$) H_2O)，它是由混合物中石灰和粉煤灰中的 SiO_2 之间发生反应生成的，这种反应在温度高于 $100^\circ C$ 以上的水热介质中急剧进行。这些水化矿物都是溶解度较低的物质，因此很容易使液相达到饱和。当液体被这些水化硅酸钙饱和后，即析出胶体粒子大小的晶粒，由于石灰与粉煤灰的溶解度和其产物在溶液中的迁移度不同，因此水化硅酸钙最先在粒子表面生成，逐步拓展到粒子间的空间内，随着液相中水化结晶物的增多，它们就逐渐胶结起来，形成结晶连生体，并把粒子胶结起来，从而使 SCA 料浆变为弹性整体。水泥中的 C_3S 水化析出的 $Ca(OH)_2$ 可以提高 SCA 料浆碱度。水泥中的 C_3A 的水化可以加速料浆初始塑性强度增长。

2.1.2.3 增力剂及其膨胀增力性

膨胀增力剂是能在 SCA 料浆中产生体积膨胀并产生膨胀压力的物质。本研究所采用的膨胀增力剂是钠基膨润土。

膨润土的物理化学性能。膨润土一般为白色、淡黄，因含铁量变化又呈浅灰、淡绿粉红、褐红、黑杂等色。具蜡状、土状或油脂光泽。膨润土有的松散如土，也有的致密坚硬。膨润土的主要化学组分是二氧化硅(SiO_2)、三氧化二铝(Al_2O_3)和水。氧化铁和氧化镁含量有时也较高。此外，钙、钠、钾等常以不同含量存在于膨润土中。膨润土的 Na_2O 和 CaO 含量对膨润土的物理化学性能和工艺技术性能影响颇大。膨润土具有吸湿性，能吸附大量的水。吸水后膨胀，能膨胀数倍，一般可达 20 余倍。在水介质中能分散呈胶体悬浮液，这种悬浮液具有一定的粘滞性、触变性和润滑性。它和水、泥或砂等细碎屑物质的掺合物有可塑性和粘结性。有较强的阳离子交换能力。对各种气体、液体、有机物质有一定的吸附能力，最大吸附量可达 5 倍于它的重量，具有表面活性的酸性漂白土能吸附有色物质。

膨润土的理化性能主要取决于它所含的蒙脱石种类和含量。一般钠基膨润土较之钙基或镁基膨润土的物理化学性质和工艺技术性能优越。主要表现在：吸水速度

慢，但吸水率和膨胀倍数大；阳离子交换量高；在水介质中分散性好，胶质较高；它的胶体悬浮液触变性、粘度、润滑性好，pH 值高；热稳定性好；有较高的可塑性和较强的粘结性；热湿拉强度和干压强度高。所以钠基膨润土的使用价值和经济价值较高。

因为膨润土具有特殊的吸水性（吸水体积膨胀 10~20），可塑性，粘结性以及很强的离子交换性，在工农业上有着广泛的应用，所以我们在静态破碎剂中加入少量的膨润土可以加强静态破碎剂的膨胀性能，使静态破碎剂具有更强的膨胀作用。因此，膨润土对改善静态破碎剂的膨胀性能有很大作用。

其次，在静态破碎剂中再加入少量的高效减水剂，以减少用水量，降低水灰比，防止药喷的发生，增加膨胀压。但高效减水剂的掺量不应该过大，一般情况下，高效减水剂的掺量为静态破碎剂重量的 0.2%~1%。

2.2 试验方案，设备及原材料

2.2.1 试验方案

在前人工作和初步试验的基础上，并根据资料分析和热力学的初步分析计算结果，确定了以生石灰为静态破碎剂的主要成分，外加多种辅助成分以改善其膨胀性能和反应速度的实验方案。进行了大量的实验，对静态破碎剂的基本配制工艺按照正交试验的方法进行优化。

在配制中涉及的因素分别有：

- ① 生石灰的加入量；
- ② 水泥的加入量；
- ③ 粉煤灰的加入量；
- ④ 石膏的加入量；
- ⑤ 缓凝高效减水剂的加入量；
- ⑥ 钠基膨润土的加入量。

静态破碎剂的配制实验过程如图 2.1 所示。

本静态破碎剂是在传统的破碎剂研究的基础上，加入新的辅助成分以改善其膨胀性能和反应速度。通过实验，并利用静态破碎剂的容重测试，反应速度测试，膨胀压力测试，对其性能进行测定。最后确定了静态破碎剂的配方。

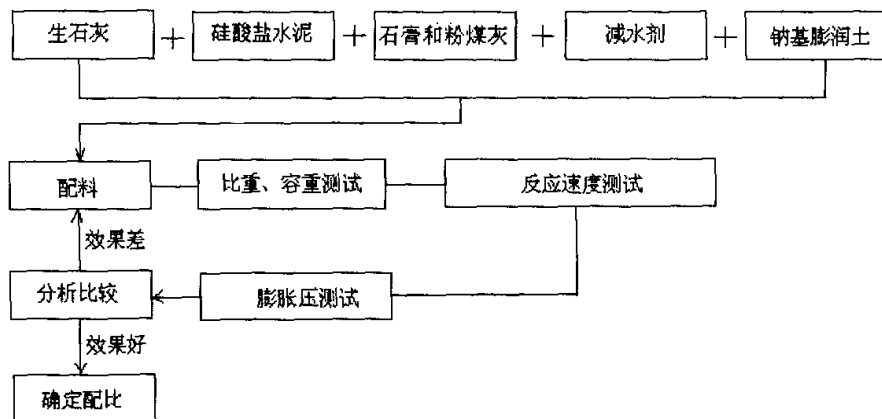


图 2.1 静态破碎剂研制过程框图

从图 2.1 中可知，静态破碎剂的配制试验过程分为以下几个步骤：

(1) 静态破碎剂的各成分的选取和称量。主剂为氧化钙，在实验的初始阶段采用的纯度比较高的生石灰，在后面的实验中采用的是工业生石灰。这样，能保证实验的准确性和经济性。

(2) 比重，容重的测试。把配好的静态破碎剂取出，进行称重，体积测量，然后进行比重容重计算。

(3) 反应速度的测试。

(4) 膨胀压测试。

(5) 对测试结果进行分析。

2.2.2 试验设备

本阶段所用试验仪器设备如表 2.1 所示。

表 2.1 本阶段所用试验仪器设备一览表

名称	用途	规格	数量	备注
搅拌器	合成搅拌	40W、0—600 转/分	1 台	—
冲击钻	钻孔	—	1 台	—
托盘天平	称量	100g、1000g、5000g	2 台	感量 1g、5g
烧杯	容器	1000ml、500ml	4 只	—
膨胀压测压仪	测压	—	1 台	—
钢尺	测量	1 米	1 把	—
刮刀、抹刀	—	—	各 1	—
秒表	—	—	2 块	—
试管	—	100 ml 50 ml	各 5	—

名称	用途	规格	数量	备注
温度计	测温	—	2个	—
白口小瓶	容器	60 ml	2只	—
量筒	量器	100 ml	2只	—
钻头	工具	—	8只	—
搅棒	搅拌	—	2只	—
模具	制作试块	—	5种	—
磅称	称量	—	1台	—
铁板	—	—	1块	—

2.2.3 试验所需的原材料

(1) 生石灰：参加反应的主要成份应具有良好的活性，不同的煅烧温度对其反应速度，反应的成熟度及相应的体积膨胀效应，均有明显影响。900℃煅烧的生石灰，膨胀率最大，达到250%。

(2) 硅酸盐水泥：所选用的水泥应具有较高标号，本试验采用陕西秦岭水泥有限公司生产的秦岭P.O42.5R水泥，主要指标如表2—2所示。

表2—2 秦岭P.O42.5R水泥主要指标

密度(g/cm ³)	抗压强度(MPa)		抗折强度(MPa)		凝结时间(min)		安定性
	3d	28d	3d	28d	初凝	终凝	
3.09	28.9	48.7	5.8	7.6	155	230	合格

(3) 石膏：采用CaSO₄·2H₂O，主要性能指标如表2—3所示。

表2—3 石膏的化学成分

名称	化学成分 / %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	结晶水
天然二水石膏	2.49	1.04	0.30	32.45	2.28	40.51	20.93

(4) 膨润土：主要增加膨胀压力。膨润土的主要矿物是蒙脱石(Montmorillonite)含少量碱及碱土金属的含水铝硅酸盐矿物，属于铝硅酸盐族，其化学通式为：



膨润土的膨胀性能以膨胀容表示，膨润土在稀盐酸溶液中膨胀后的容积称为膨

胀容，以毫升/克样表示。钠基膨润土比钙基、酸性膨润土的膨胀容高；同一属型的膨润土，含蒙脱石愈多，膨胀容愈高。膨胀容是鉴定膨润土矿石属性和估价膨润土质量的技术指标之一。

(5) 减水剂：本试验采用氨基磺酸盐系高效减水剂。氨基磺酸盐系高效减水剂有液状产品以及浅黄褐色粉末状的粉剂产品。该类减水剂的主要特点是氯离子含量低以及 Na_2SO_4 含量低。其掺量一般为 0.5%-1%。该类减水剂在水泥颗粒表面呈环状和引线状，能显著降低水泥颗粒表面的负电位，因此其分散减水作用机理仍以静电斥力为主，并具有较强的空间位阻斥力作用。同时，由于减水剂具有强亲水性羟基，能使水泥颗粒表面形成较厚的水化膜，故具有较强的水化膜润滑分散减水作用。所以氨基磺酸盐系高效减水剂对水泥颗粒的分散效果更强，对水泥的适应性明显提高。另外，在氨基磺酸盐系高效减水剂中加入少量的蔗糖，得到一种理想的缓凝高效减水剂^[1]。

(6) 粉煤灰：电厂生产的优质粉煤灰。本试验采用陕西渭河电厂产正元 I 级粉煤灰，主要指标如表 2—4 所示。

表 2—4 正元 I 级粉煤灰主要指标

化学成分 (%)					密度 (g/cm^3)	需水量比 (%)	烧失量 (%)	等级
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO				
55.21	26.38	4.22	1.75	1.58	2.21	87.5	2.5	一级

2.3 静态破碎剂配比的优化研究

2.3.1 配比的选择原则

配比的选择是静态破碎剂最优配方配制过程中的重要环节。通过配比的选择，可以根据实际需要，对静态破碎剂性能进行局部调查。当掌握了各种材料的添加剂量对静态破碎剂的性能影响规律后，就可以选择不同的配比得到不同的配方，来满足不同的要求。

2.3.2 正交试验设计

静态破碎剂的主要成分是氧化钙，氧化钙与水反应生成氢氧化钙的反应是静态破碎剂产生膨胀压力的来源。破碎剂研制的难点在于怎样提高静态破碎剂的性能要求：一是提高静态破碎剂的容重，同时减小水灰比来增加膨胀压力；二是增加反应物的活性或提高反应温度来提高反应速度，为防止冲孔现象的发生，就需添加能强烈吸收水蒸气又能在以后的反应中将水释放出来的物质。在此基础上确定了以氧化钙为静态破碎剂的主要成分，外加多种辅助成分以改善其膨胀性能和反应速度的研

制方案。

2.3.2.1 膨胀压力测试方法

膨胀压是衡量爆破效果的重要指标。破碎剂的膨胀压值是通过试验测定的。

目前，所用的膨胀压力测试方法，一般都是采用电阻应变片测量法，测量方法如图 2.2 和图 2.3 所示，把静态破碎剂置于一厚壁圆形筒中，钢筒的外壁贴有电阻应变片式拉力传感器，当钢筒中的静态破碎剂发生水化反应时，体积发生膨胀后，必然在钢筒的内部产生一个径向的膨胀压力，从而引起圆筒沿径向的扩张变形，通过贴在圆筒外壁的电阻应变片可测得外壁的弹性变形，利用弹性力学中的薄壁圆筒理论即可求得圆筒内壁上作用的膨胀压力的大小。

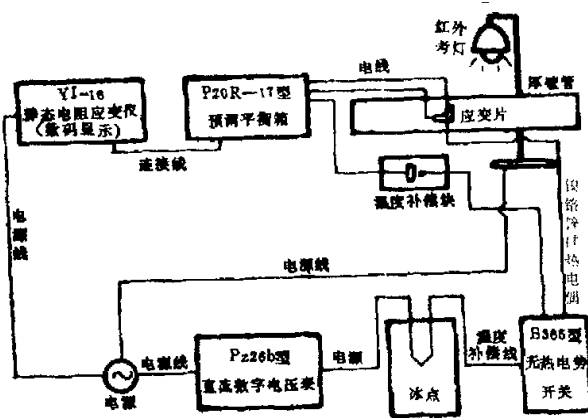


图 2.2 电阻应变片热输出曲线标定实验装置

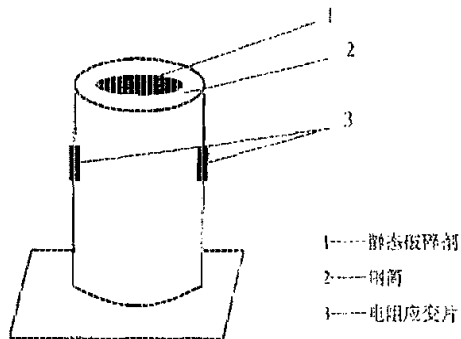


图 2.3 电阻应变片

电阻应变片测量方法的缺点是显而易见的。①由于用到了传感器，须把应变值转化为电信号，必然涉及到传统的灵敏度，干扰等问题。②反应是一个放热的过程，应考虑圆筒的热胀冷缩问题。另外，钢是热的良导体，热量能通过圆筒传给应变片，从而影响测量结果，必须考虑应变片的温度补偿问题。③钢的变形模量大于岩石的

变形模量，因而测量装置不能真实反映实际应用中的约束情况。测量值应该偏小。
④测量过程中还存在操作麻烦，应变片的标准比较复杂，计算繁杂，读数不够直观等问题。

通过以上分析，我们认为电阻应变片测压系统不适于静态破碎剂研制过程中的膨胀压力测试。因为，在测定静态破碎剂膨胀压过程中，由于静态破碎剂水化初期会伴随有大量热量释放出来，造成一个不稳定的温度场。但有关破碎剂侧压的文献中均未提出如何排除此种温度效应。如果不加以排除，则只有在破碎剂水化后期，当水化热量释放殆尽，温度效应自行消失时，才能测到一个较准确的膨胀压终值，而难以说明膨胀压产生的全过程。

所以，此装置实际中难以推广。为此，我们选用一种液压式平衡测压仪来测量静态破碎剂的膨胀压。

液压式平衡测压仪由主件和配套附件构成。配套附件包括手压式油泵和自动控温加热装置。主件是自行研制，其主要尺寸如图 2.4 所示。油缸，物料缸和活塞等采用 45[#]钢，底座采用两块厚 40 毫米的球墨柱体铁板联结。油缸在 35MPa 的压力下保压 4 小时后，表压显示 34.2MPa，平均每小时下降 0.57%，符合使用要求。测压时，先由装料孔灌入破碎剂料浆，打开手压油泵进油阀，徐徐将油打入油缸，使活塞向料缸方向滑动，至料缸出气孔有料浆溢出时，停止打油，记下平衡指针所示刻度。在测量过程中，始终保持指针所指原始刻度不变，由表压所示数值乘以系数 2.25（料缸与油缸之间的面积比），即得破碎剂膨胀压^[9]。

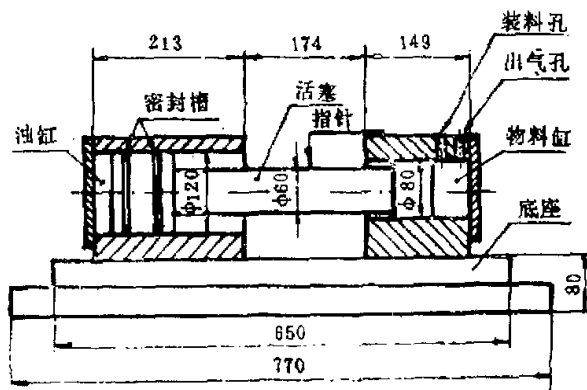


图 2.4 液压式平衡测量仪

使用同一种静态破碎剂，液压式平衡测压法与厚壁管电测法测得结果相比较，两者的膨胀压终值基本一致。但测压前期，电测法的数值明显地受到温度效应的影响。所以，应采用液压式平衡测压法以保证数值的准确性。

2.3.2.2 正交试验过程

在本次试验过程中,采用液压式平衡测压法测量静态破碎剂的膨胀压力.把对静态破碎剂性能影响很大的因素定为主要因素:生石灰、硅酸盐水泥、石膏、膨润土。主要的控制指标为材料对膨胀压力的影响。分析试验结果并确定静态破碎剂主要组分的最佳掺量。

本研究采用正交实验得出了在一定的环境温度时,水灰比为0.3,用正交试验设计进行4因素3水平试验,具体取值见表2—5,查正交表,手工进行试验设计、数据计算和分析。

表2—5 因素和水平表

因素 水平	生石灰 (A)	硅酸盐水泥 (B)	石 膏 (C)	钠基膨润土 (D)
水平 I	55%	6%	1%	1.0%
水平 II	60%	7%	2%	1.5%
水平 III	65%	8%	3%	2.0%

本次实验,静态破碎剂的主要组分生石灰、硅酸盐水泥、石膏、钠基膨润土的用量按照正交表的水平加入,其余的组分的用量为:缓凝高效减水剂为静态破碎剂重量的1%;粉煤灰填充剂为剩余百分重量。具体数据如表2—6所示。

表2—6 $L_9(3^4)$ 正交试验具体数据(重量%)

因素 试验号	A 生石灰	B 硅酸盐水泥	C 石膏	D 膨润土	减水剂	填充剂	合计
1	(I)55%	(I)6%	(I)1%	(I)1.0%	1%	36.0%	100%
2	(I)55%	(II)7%	(II)2%	(II)1.5%	1%	33.5%	100%
3	(I)55%	(III)8%	(III)3%	(III)2.0%	1%	31.0%	100%
4	(II)60%	(I)6%	(II)2%	(III)2.0%	1%	29.0%	100%
5	(II)60%	(II)7%	(III)3%	(I)1.0%	1%	28.0%	100%
6	(II)60%	(III)8%	(I)1%	(II)1.5%	1%	28.5%	100%
7	(III)65%	(I)6%	(III)3%	(II)1.5%	1%	23.5%	100%
8	(III)65%	(II)7%	(I)1%	(III)2.0%	1%	24.0%	100%
9	(III)65%	(III)8%	(II)2%	(I)1.0%	1%	23.0%	100%

注:本试验在测定静态破碎剂膨胀压时,所采用的装药量都是200克。

表 2-7 静态破碎剂膨胀压测试结果

项目 试验号	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)
1	1	10.3	4	16.0	7	18.2	10	20.8
2	1	13.6	4	17.2	7	19.0	10	21.6
3	1	11.7	4	17.8	7	19.1	10	23.2
4	1	14.2	4	17.0	7	20.8	10	24.8
5	1	10.7	4	16.2	7	18.5	10	23.5
6	1	12.1	4	18.0	7	19.5	10	24.1
7	1	13.3	4	17.3	7	19.6	10	25.6
8	1	14.7	4	18.8	7	20.1	10	26.8
9	1	12.1	4	15.6	7	19.4	10	24.7

从直观上看,分析静态破碎剂 10 小时膨胀压值,由表的第一因素 A 分别计算每一种水平上的试验值的平均数;然后,再分别计算第二因素 B、第三因素 C、第四因素 D 每一种水平上的试验值的平均数。具体数值如表 2-8。

表 2-8 试验数据的分析

指标名称		因素	A	B	C	D
			生石灰	PO42.5R	石膏	膨润土
膨 胀 压 力 (MPa)	I	65.6	71.1	71.9	69	
	II	72.4	71.7	71.7	71.4	
	III	77.1	72	72.3	75.0	
	$k_1 = I / 3$	21.9	23.7	23.9	23.0	
	$K_2 = II / 3$	24.1	23.9	23.7	23.8	
	$K_3 = III / 3$	25.7	24.0	24.1	25.0	
	极差 $R = k_{max} - k_{min}$	3.8	0.3	0.4	2.0	

以每个因素各水平代表的实际状态为横坐标,以试验结果膨胀压为纵坐标,画出各因素对静态破碎剂膨胀压的影响。从图中我们很容易看出各因素对静态破碎剂膨胀压的影响。

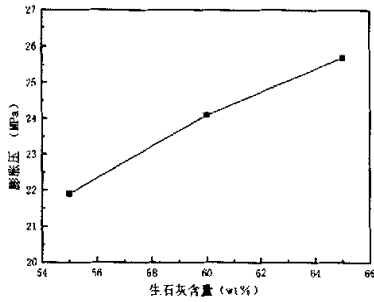


图 2.4 生石灰掺量与膨胀压的关系

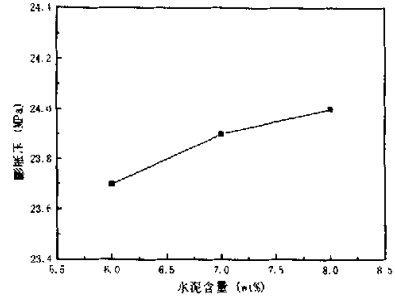


图 2.5 水泥掺量与膨胀压的关系

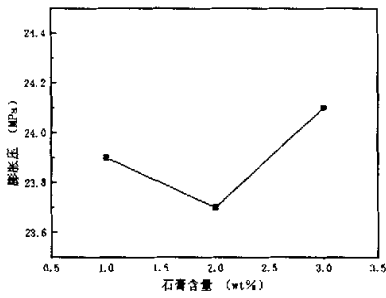


图 2.6 石膏掺量与膨胀压的关系

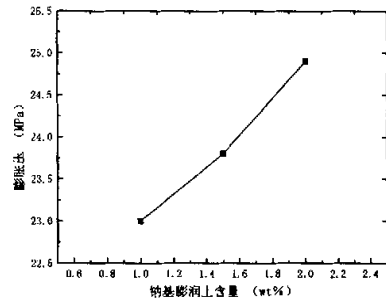


图 2.7 膨润土掺量与膨胀压的关系

表 2—9 方差分析表

试验号	A	B	C	D	膨胀压	膨胀压平方
1	1	1	1	1	20.8	433
2	1	2	2	2	21.6	467
3	1	3	3	3	23.2	539
4	2	1	2	3	24.8	615
5	2	2	3	1	23.5	553
6	2	3	1	2	24.1	581
7	3	1	3	2	25.6	656
8	3	2	1	3	26.8	719
9	3	3	2	1	24.7	610
K ₁	65.6	71.2	71.7	69.0	215.1	5171
K ₂	72.4	71.9	71.1	71.3		
K ₃	77.1	72	72.3	74.8		
U	5162	5142	5142	5147	5141	
Q	21	1	1	6		

从图 2.4 中可以看出, 平均膨胀压的极差为 3.8, 从图 2.5 中平均膨胀压的极差为 0.3, 从图 2.6 中平均膨胀压的极差为 0.2, 从图 2.7 中平均膨胀压的极差为 1.9。由此说明生石灰的含量对膨胀压的影响最大, 钠基膨润土的含量对膨胀压的影响次之, 水泥和石膏的含量对膨胀压的影响较小。那么, 哪一个因素对试验结果影响更显著? 方差分析结果见表 2—9 和表 2—10 所示。

表 2—10 方差分析表

来源	离差	自由度	均方离差	F 值
A	21	2	10.5	21
B	1	2	0.5	1
C	1	2	0.5	1
D	6	2	3.0	6
误差	1	2	0.2	
总和	30	10		

给定 $\alpha=5\%$, 查表得 $F_{\alpha}(2,2)=19$, $F_A=21>19$, 这表明生石灰的含量对膨胀压有明显的影响, 而钠基膨润土的含量对膨胀压也有较大的影响。

根据上述图表分析, 我们可以看出随着四种因素的变化, 也就是四种物质掺量的增加, 膨胀压也在不断地增大。所以, 我们就需要不断改变掺量, 来提高静态破碎剂的膨胀压力, 直到随着掺量的增加, 静态破碎剂的膨胀压力变化不大, 或者随着掺量的增加膨胀压减小。从而找出各种物料的最佳掺量, 确定静态破碎剂的配合比。所以我们还应该继续做第二次正交试验来确定静态破碎剂的最终掺量, 也就是最佳掺量。

为了进一步提高正交试验的可靠性, 继续扩大影响因素的水平范围, 进行第二次正交试验, 以便确定静态破碎剂的主要组分的最佳掺量。

本研究仍采用正交实验得出了在一定环境温度时, 水灰比为 0.3, 正交试验设计进行 4 因素 3 水平试验, 具体取值见表 2—11, 查正交表, 手工进行试验设计、数据计算和分析。

表 2—11 因素和水平表 (重量%)

因素 水平	生石灰 (A)	硅酸盐水泥 (B)	石膏 (C)	钠基膨润土 (D)
水平 I	70%	9%	2%	2.5%
水平 II	75%	10%	3%	3.0%
水平 III	80%	11%	4%	3.5%

本次实验，静态破碎剂的主要组分生石灰、硅酸盐水泥、石膏、钠基膨润土的用量按照正交表的水平加入，其余的组分的用量为：减水剂为静态破碎剂的1%；粉煤灰填充剂为剩余百分重量。具体数据如表 2-12 所示。

表 2—12 L₉(3⁴)正交试验具体数据(重量%)

因素 试验号	A 生石灰	B 水泥	C 石膏	D 膨润土	减水剂	填充剂	合计
1	(I)70%	(I)9%	(I)2%	(I)2.5%	1%	13.5%	100%
2	(I)70%	(II)10%	(II)3%	(II)3.0%	1%	13.0%	100%
3	(I)70%	(III)11%	(III)4%	(III)3.5%	1%	10.5%	100%
4	(II)75%	(I)9%	(II)3%	(III)3.5%	1%	8.5%	100%
5	(II)75%	(II)10%	(III)4%	(I)2.5%	1%	7.5%	100%
6	(II)75%	(III)11%	(I)2%	(II)3.0%	1%	8.0%	100%
7	(III)80%	(I)9%	(III)4%	(II)3.0%	1%	3.0%	100%
8	(III)80%	(II)10%	(I)2%	(III)3.5%	1%	3.5%	100%
9	(III)80%	(III)11%	(II)3%	(I)2.5%	1%	2.5%	100%

表 2—13 静态破碎剂膨胀压测试结果

项目 试验号	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)	时间 (h)	膨胀压 (MPa)
1	1	18.0	4	23.6	7	29.0	10	36.8
2	1	21.0	4	24.7	7	33.3	10	39.5
3	1	20.3	4	24.5	7	32.5	10	38.6
4	1	18.1	4	22.5	7	28.3	10	36.2
5	1	17.3	4	21.7	7	26.6	10	33.2
6	1	17.7	4	22.2	7	27.1	10	34.0
7	1	15.2	4	19.6	7	25.1	10	32.1
8	1	16.6	4	20.8	7	25.9	10	33.4
9	1	14.6	4	19.2	7	24.7	10	31.1

从直观上看，分析静态破碎剂 10 小时膨胀压值，由表的第一因素 A 分别计算每一种水平上的试验值的平均数；然后，再分别计算第二因素 B、第三因素 C、第四因素 D 每一种水平上的试验值的平均数。具体数值如下：

表 2—14 四种因素的膨胀压平均值

指标名称		因素			
		A 生石灰	B P.O42.5R	C 石膏	D 膨润土
膨 胀 压 力 (MPa)	I	114.9	105	104.1	101.1
	II	103.5	106.2	106.8	105.6
	III	96.6	103.8	103.8	108.3
	$k_1 = I / 3$	38.3	35.0	34.7	33.7
	$K_2 = II / 3$	34.5	35.4	35.6	35.2
	$K_3 = III / 3$	32.2	34.6	34.6	36.1
	极差 $R = k_{\max} - k_{\min}$	6.1	0.8	1.0	2.4

以每个因素各水平代表的实际状态为横坐标，以试验结果膨胀压为纵坐标，画出各因素对静态破碎剂膨胀压的影响。从图中我们很容易看出各因素对静态破碎剂膨胀压的影响。

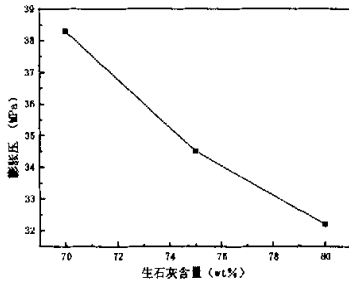


图 3.8 生石灰掺量与膨胀压的关系

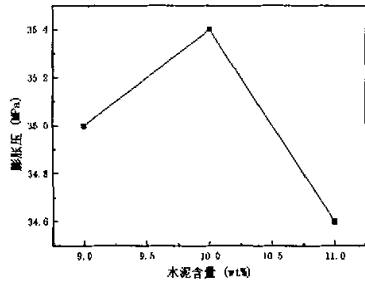


图 3.9 水泥掺量与膨胀压的关系

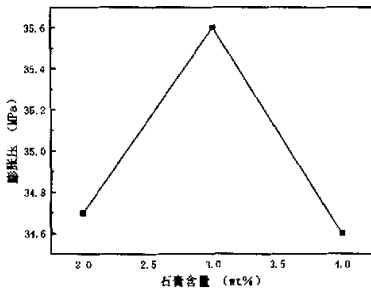


图 3.10 石膏掺量与膨胀压的关系

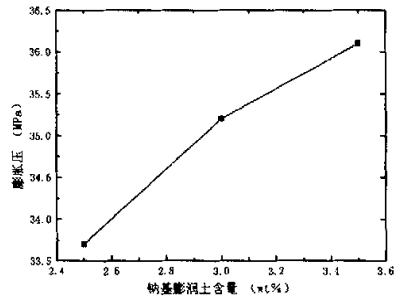


图 3.11 膨润土掺量与膨胀压的关系

从图 3.8 中我们可以看出, 平均膨胀压的极差为 6.1, 从图 3.9 中平均膨胀压的极差为 0.8, 从图 3.10 中平均膨胀压的极差为 1, 从图 3.11 中平均膨胀压的极差为 2.4。由此说明生石灰的含量对膨胀压的影响最大, 钠基膨润土的含量对膨胀压的影响次之, 水泥和石膏的含量对膨胀压的影响较小。那么, 哪一个因素对试验结果影响更显著? 方差分析结果^[16]见表 2—15 和 2—16 所示。

表 2—15 方差分析表

试验号	A	B	C	D	膨胀压	膨胀压平方
1	1	1	1	1	36.8	1354.2
2	1	2	2	2	39.5	1560.3
3	1	3	3	3	38.6	1490.0
4	2	1	2	3	36.2	1310.5
5	2	2	3	1	33.2	1102.3
6	2	3	1	2	34.0	1156.0
7	3	1	3	2	32.1	1030.5
8	3	2	1	3	33.4	1115.6
9	3	3	2	1	31.1	967.3
K ₁	114.9	105.1	104.2	101.1	314.9	11087
K ₂	103.4	106.1	106.8	105.6		
K ₃	96.6	103.7	103.9	108.2		
U	11075	11019	11019	11026	11018	
Q	57	1	1	8		

表 2—16 方差分析表

来源	离差	自由度	均方离差	F 值
A	57	2	28.5	57
B	1	2	0.5	1
C	1	2	0.5	1
D	9	2	4.5	9
误差	1	2	0.5	
总和	69	10		

给定 $\alpha=5\%$, 查表得 $F_{\alpha}(2,2)=19$, $F_A=57>19$, 这表明生石灰的含量对膨胀压有明显的影响, 而钠基膨润土的含量对膨胀压也有较大的影响。

所以,随着氧化钙的增加静态破碎剂的膨胀压也增大,但是当氧化钙的增加量达到一定的程度,膨胀压却减小了,因为氧化钙虽然增加了,水泥的量和粉煤灰的量却减小了,这样,静态破碎剂的容重相对减小了,所以,膨胀压也减小了。

因为钠基膨润土具有很好的膨化作用,静态破碎剂膨胀压随钠基膨润土的增加而增大,但是,掺量不宜太大,它只起增力剂的作用。而且掺量太大,即不经济,也不宜控制静态破碎剂的膨胀压。

粉煤灰能进入到物料膨胀时的细微结构中,使水化析出的有效空间增加,水化更充分,从而使膨胀能平稳地进行。

表 2-13 中是各因素水平变化时对静态破碎剂膨胀压的影响,通过对照比较各值的大小,确定了静态破碎剂的初步最佳配比为:生石灰 70%,硅酸盐水泥 10%,石膏 3%,钠基膨润土 3%,缓凝高效减水剂 1%,粉煤灰 13%

2.3.3 实测结果及分析

由于采用了正交试验的方法,所以,试验结果比较复杂,但是有其规律性。

首先,根据以上结果可知,最理想的生石灰含量为 70%左右,生石灰含量过低,膨胀压较小,但生石灰含量过高,水泥和粉煤灰含量过低,静态破碎剂的容重较小,从而膨胀压更小,普通的静态破碎剂采用粉末型,其粒子堆积较为分散,而且又不含粉煤灰,所以,产生的膨胀压较小。所开发的静态破碎剂采用的是较好颗粒级配的生石灰,其堆积紧密,容重大,在相同空间里参加反应的物质就多,因而产生的膨胀压也高。

其次,根据以上结果可知,增加了钠基膨润土的含量,因为钠基膨润土与水反应时,它的体积可以增加 10~20 倍,所以,增加了钠基膨润土的含量膨胀压提高了很多。

最后,根据以上结果可知,本静态破碎剂使用安全,不发生冲孔现象。冲孔现象的发生是由于氧化钙水化反应时大量放热,当热量聚集到一定程度时,生成大量水蒸气在孔内形成较高气压,把静态破碎剂浆体冲出孔外所致,一般出现在装药过程中。普通型静态破碎剂在装药前要事先调成浆体。因为其物质较为分散,与水充分混合后很快大量发生水化反应,并放出大量的热量。而这时大量存在的热量聚集到一定程度之后,生成大量水蒸气,这时的静态破碎剂浆体还未产生膨胀压力,不具备一定强度,粘稠的浆体极易从孔中喷出。所开发的静态破碎剂由于采用较好粒级的生石灰,反应放出的热量不易聚集,所以不会发生冲孔现象。同时,加入了粉煤灰,它能进入到物体膨胀时的细微结构中,使水化析出的有效空间增加,水化更充分,从而使膨胀能平稳地进行。

本正交试验共做了二次四因素三水平 18 批实验,其中第二次第 2 批是 18 批试

验中膨胀压最大的一批，达到 39.5MPa。所以，根据以上试验结果确定了静态破碎剂的最佳掺量。

2.4 静态破碎剂最佳配比的确定

根据试验结果和传统工艺所积累的经验，得出静态破碎剂的最佳配合比值如下表：

表 2-17 静态破碎剂最佳配方

因素	生石灰	PO42.5R 水泥	石膏	缓凝高效减水剂	粉煤灰	钠基膨润土
参数	70%	10%	3%	1%	13%	3%

2.5 静态破碎剂比重、容重和反应速度的测定

2.5.1 静态破碎剂比重的测定

(1) 主要的仪器和设备：比重瓶（容积为 220ml，带有长 20cm、直径约 10mm 的细径，细径有刻度，读数精确至 0.1cm³）；恒温水槽；温度计；天平；烘箱。

(2) 试验步骤：首先，将无水煤油注入清洁、干燥的比重瓶内，直到液面下部达到零刻度处。再将装好煤油的比重瓶放入恒温（15℃）水槽内恒温 0.5h。取出比重瓶，记录比重瓶液面的刻度（精确到 0.05cm³）。然后先把静态破碎剂试样在 110℃ 下烘干 1h，而后冷却至室温。称取静态破碎剂试样 60g（精确到 0.01g）。将试样用小匙装入比重瓶中。最后盖上比重瓶塞，将比重瓶绕着直轴摇荡数次。使比重瓶内液体中的气泡完全排出。将它置于恒温水槽中，再恒温 0.5h，记录液面刻度。

(3) 试验结果：60g 静态破碎剂排出的液体（无水煤油）的体积，第一次测得的体积为 20.4cm³，第二次测得的体积为 20.2cm³。

按下式计算静态破碎剂的比重：

$$\rho = m / v$$

式中： ρ —静态破碎剂的比重，g/cm³；

m —装入比重瓶中静态破碎剂的重量，g；

v —被静态破碎剂排出的液体（无水煤油）的体积，即将第二次读数减去第二次读数，cm³。

计算得出： ρ_1 为 2.94g/cm³， ρ_2 为 2.97g/cm³。以上两个试样结果的算术平均值作为测定值，测定值为 2.96g/cm³。

2.5.2 静态破碎剂容重的测定

(1) 主要的仪器和设备:天平;容量筒 100ml;烘箱;铝制料勺;直尺。

(2) 试验步骤:首先,称量容量瓶重量 G_1 g,用料勺将试样慢慢装入容量瓶中,装至筒口上面成锥形为止。然后,用直尺将筒口上面的试样,沿筒口中心线向两个相反方向刮平。称量容量瓶及试样的总重量 G_2 g。

(3) 试验结果计算:第一次测得的试样重量为 184g,第二次测得的试样重量为 186g。试样的容重 ρ_0 按下式计算, $\rho_0 = (G_2 - G_1) / V$ 。以上两个试样结果的算术平均值作为测定值,测定值为 $1.85 \text{g} / \text{cm}^3$ 。

2.5.3 静态破碎剂反应速度的测定

静态破碎剂的主要成分是氧化钙,它遇水起化学反应,此项反应的快慢称为静态破碎剂的反应速度。由于这个反应是放热反应,所以静态破碎剂的反应速度的测定是以静态破碎剂加入水中至上升至最高温度所需的时间为静态破碎剂的反应速度。

(1) 仪器设备:保温瓶(瓶胆全长 160mm;瓶身直径 61mm;口内径 28mm;容量 200mL;上盖白色橡胶塞,在塞中心插温度计);长尾水银温度计(量程 150°C);秒表;天平(称量 100g);玻璃量筒(50ml)。

(2) 试验步骤:首先,检查保温瓶上盖及温度计装置,温度计下端应插入试样中间。然后,在保温瓶中加入 20°C 蒸馏水 20ml;称取试样 10g,倒入保温瓶的水中,立即开动秒表,同时盖上盖,轻轻摇动保温瓶数次,自试样倒入水中时算起,每隔 30s 读一次温度,临近终点仔细观察,记录达到最高温度及温度开始下降的时间,以达到最高温度所需时间为静态破碎剂的反应速度。

(3) 结果计算:第一次测得的时间为 45 分钟,第二次测得的时间为 47 分钟。以两次测定结果的算术平均值为结果得出静态破碎剂的反应速度为 46 分钟。

2.5.4 结论

通过试验结果可以看出,经过改变各种添加成分的含量,在兼顾膨胀压力的前提下基本上可以把反应速度控制在几十分钟左右。经过测定,静态破碎剂的容重 $1.85 \text{g} / \text{cm}^3$ 左右,比重一般在 $2.96 \text{g} / \text{cm}^3$ 左右。

2.6 本章小节

从本章的试验及试验结果分析比较可以得出以下结论:

- (1) 静态破碎剂由主剂氧化钙,外加辅助成分等各种添加成分组成。
- (2) 确定静态破碎剂的成分、配比及制造条件是一个相当复杂的过程,需要做大

量的实验.

(3) 经过改变各种添加成分的含量,以及各种制造条件,在兼顾膨胀压的前提下,基本上可以把反应速度控制在 50 分钟左右。

(4) 采用本试验设计和参数优化技术可使试验次数大幅度下降,节约大量的时间和经费,产品的技术经济指标得到进一步的改善,对新产品的研制和老产品的技术改进卓有成效,这项技术属于通用技术,各行业都能用,是处进生产力和提高企业经济效益的好方法。

3 静态破碎剂的性能测试

3.1 前言

静态破碎剂的性能测试包括膨胀压力测试和混凝土岩石开裂试验两部分。前面已经讲到,膨胀压力是衡量静态破碎剂性能的一项重要指标。测定其膨胀压力是静态破碎剂研制过程中不可缺少的一个环节,也是一个极其重要的手段。而岩石开裂试验就是直接把静态破碎剂用于试验中。通过观察开裂时间能综合评估静态破碎剂的膨胀压力及反应速度,与膨胀压力测试相比,反映静态破碎剂的优劣更直接。但混凝土、岩石开裂试验不能代替膨胀压测试,因为它不能定量地给出膨胀压力的大小。所以说,膨胀压力测试与混凝土及岩石开裂试验是相辅相成的,它们都是静态破碎剂性能测试不可缺少的部分。

以下分别介绍在静态破碎剂研制过程中所涉及的膨胀压力测试以及混凝土岩石开裂试验在膨胀压力测试部分所选用的一种液压测压系统,与传统测压方法相比,具有操作简单方便,结果准确可靠等特点。利用这套系统,可以获得一组所开发的静态破碎剂的膨胀压力数据。把这些数据按不同比较内容绘制成膨胀压力曲线,并对曲线进行分析,可以得出测得的膨胀压力与水灰比及使用药量的关系。所开发的静态破碎剂与市场同类产品的膨胀压力对比关系,膨胀压力与环境温度的关系,即研制开发的静态破碎剂的耐候性能测试。在此基础上,对影响静态破碎剂的膨胀压力的因素进行全面的分析,以解决一些实际问题。

在混凝土、岩石开裂试验部分,把研制开发的静态破碎剂应用于实际混凝土和岩石开裂试验中,并与其它静态破碎剂做对比试验,以检验其性能。

由于采用了新方法,研制开发出来的静态破碎剂,膨胀压力大,应用中还避免了冲孔现象的发生。前面已分析了为什么采用所开发的静态破碎剂不会发生冲孔现象。我们在多次试验中从未发生过冲孔现象。因此,所开发的静态破碎剂具有很大的优越性。

3.2 膨胀压力测试的方法

所用的膨胀压力测试方法,一般都是采用电阻应变片测量法,把静态破碎剂置于一厚壁圆形筒中,钢筒的外壁贴有电阻应变片式拉力传感器,当钢筒中的静态破碎剂发生水化反应时,体积发生膨胀后,必然在钢筒的内部产生一个径向的膨胀压力,从而引起圆筒沿径向的扩张变形,通过贴在圆筒外壁的电应变片可测得外壁的弹性变形,利用弹性力学中的薄壁圆筒理论即可求得圆筒内壁上作用的膨胀压力

的大小。

电阻应变片测量方法的缺点是显而易见的。①由于用到了传感器，须把应变值转化为电信号，必然涉及到传统的灵敏度，干扰等问题。②反应是一个放热的过程，应考虑圆筒的热胀冷缩问题。另外，钢是热的良导体，热量能通过圆筒传给应变片，从而影响测量结果，必须考虑应变片的温度补偿问题。③钢的变形模量大于岩石的变形模量，因而测量装置不能真实反映实际应用中的约束情况。测量值应该偏小。④测量过程中还存在操作麻烦，应变片的标准比较复杂，计算繁杂，读数不够直观等问题。

通过以上分析，我们认为电阻应变片测压系统不适于静态破碎剂研制过程中的膨胀压力测试。

所以，我们仍采用液压式平衡测压仪，因为液压式平衡测压方法与厚壁管电测法所测得结果相比较，两者的膨胀压终值基本一致。但测压前期，厚壁管电测法的数值明显地受到温度效应的影响。而液压式平衡测压方法是一种简单、直观、可靠的测压新方法，仪器可重复使用，受环境温度影响小。值得我们去研究。

以上是所开发的静态破碎剂膨胀压力测试所采用的方法。表 3-1 给出了一次压力测试中某种静态破碎剂（由某静态爆破开发分公司生产的某型号静态破碎剂）的测试结果，绘制成膨胀压力—时间关系曲线如图 3.1 所示。

表 3-1 某种静态破碎剂的膨胀压力

反应时间 (min)	0	30	60	90	120	150	240	300	360	420
膨胀压力 (MPa)	0	13.2	19.5	19.8	20.5	21.2	22.7	23.5	24.1	24.8

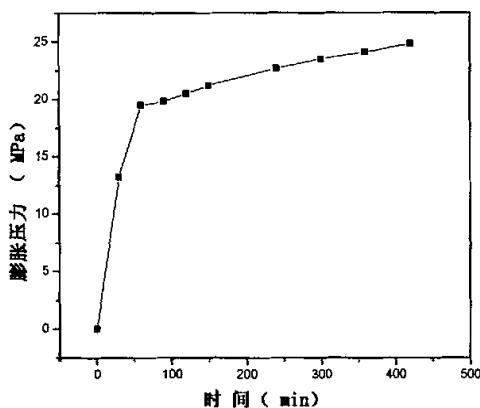


图 3.1 膨胀压力与时间曲线关系图

这种采用液压进行固体材料膨胀压力测试的方法,方便直观,使用成本非常低。可用于固体材料的膨胀压力测试,膨胀机理研究,膨胀条件模拟试验,膨胀控制研究等方面。为固体膨胀材料膨胀压力的测试提供了一种新方法。可广泛应用于静态破碎剂的研究。

由于采用液压测压的方法,在高压条件下,这套系统也有本身难以克服的问题,即密封性问题,测试时以液体为介质,对密封要求比较高,稍有泄露即大大影响测试结果。所以,保证系统的密封性是急需改进的问题。

3.3 静态破碎剂压力测试与分析

如前所述,膨胀压力是衡量静态破碎剂性能的一项重要指标。测定其膨胀压力是静态破碎剂研制过程中一个极其重要的手段。静态破碎剂成分配比及制造条件,很大一部分是由其膨胀压力来确定的。因此,在静态破碎剂的研制过程中,我们选用液压式测压装置对所研究的静态破碎剂的膨胀压力进行了多次测试。为了了解不同因素对静态破碎剂的影响,采用不同条件对静态破碎剂的膨胀压力进行测试,为了了解所研制开发的静态破碎剂的耐候性能,即不同环境温度对膨胀压力的影响,分别在不同季节进行膨胀压力测试。

3.3.1 膨胀压力测试

静态破碎剂的膨胀压力测试值受到诸多因素的影响。为了认识这些因素对静态破碎剂膨胀压力的影响,我们不断采取不同水灰比、不同孔径及不同药量等条件对所开发的静态破碎剂进行多次测试和研究。为了了解不同产品的性能,我们分别对某产品 1、产品 2 及自行研制开发的静态破碎剂进行膨胀压力测试。为了了解不同装药量对静态破碎剂膨胀压力的影响,分别对不同的静态破碎剂进行膨胀压力测试,测试结果如下:

3.3.1.1 水灰比对静态破碎剂膨胀压力的影响

测试试样为所开发的静态破碎剂,装药量为 200g,水灰比分别为 0.3、0.34 及 0.38,测试结果如表 3-2 所示。

从图 3.2 可以看出,水灰比对静态破碎剂的膨胀压力有一定的影响,随着水灰比的增大,静态破碎剂的膨胀压力随着减小,水灰比越小,静态破碎剂的膨胀压力越大。但是,静态破碎剂的水灰比不能太小,水灰比太小,虽然可以增加静态破碎剂的膨胀压力,却影响静态破碎剂的施工性能。所以,必须控制好静态破碎剂的水灰比。所开发的静态破碎剂的施工水灰比为 0.3。这时,它的施工性能比较好,膨胀压力也比较大。

表 3—2 静态破碎剂膨胀压力测试结果

水灰比	0.3						
时间 (h)	1	3	5	7	10	12	15
膨胀压 (MPa)	18.1	25.5	31.6	33.6	38.4	39	39.2
水灰比	0.34						
时间 (h)	1	3	5	7	10	12	15
膨胀压 (MPa)	17.4	22.1	29.2	32.2	35.1	35.8	36.1
水灰比	0.38						
时间 (h)	1	3	5	7	10	12	15
膨胀压 (MPa)	15.2	20.5	26.2	29.3	31.1	32.8	33.1

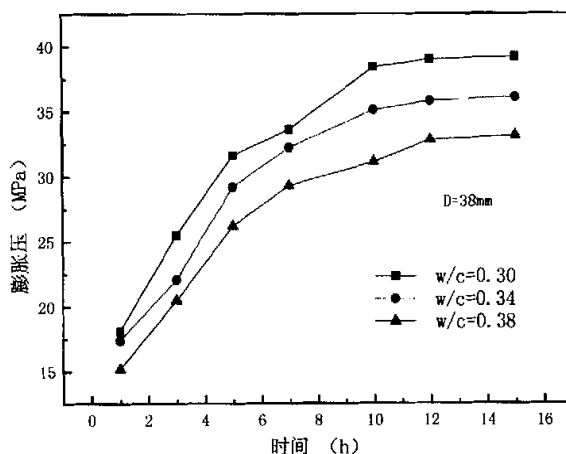


图 3.2 水灰比与膨胀压力关系图

3.3.1.2 装药量对静态破碎剂膨胀压力的影响

测试样品试样 1、试样 2、试样 3、试样 4 及试样 5 为所开发的静态破碎剂,药量分别为 150 克、180 克、200 克、230 克及 260 克,绘制成膨胀压力—时间关系曲线如图 3.3 所示。

从图 3.3 中可以看出,在一定的水灰比和一定的温度条件下,随着药量的增大,静态破碎剂的膨胀压力也不断增大。静态破碎剂所能达到的膨胀压力几乎与其药量成正比。

从图中可以看出,膨胀压力越大,其曲线起伏越大;膨胀压力越小,其曲线起伏越平缓。

表 3—3 静态破碎剂膨胀压力测试结果

样品	1		2		3		4		5	
药量	150g		180g		200g		230g		260g	
测试 结果	时间 (h)	压力 MPa	时间 (h)	压力 MPa	时间 (h)	压力 MPa	时间 (h)	压力 MPa	时间 (h)	压力 MPa
	1	18.3	1	20.5	2	23.6	1	25.3	1	25.9
	2	20.5	2	23.8	4	26.3	4	27.5	5	28.4
	3	22.6	5	26.3	6	29.4	7	32.4	7	33.9
	5	22.6	7	27.5	10	30.2	12	32.9	10	35.1
	7	22.6	8	28.1	15	30.5	16	33.2	12	35.7
	9	23.1	9	28.4	21	31.4	18	33.6	16	35.9
	20	23.4	11	28.3	26	32.8	23	33.6	20	36.7
	24	24.1	13	28.5	32	33.6	29	33.9	24	36.9
	30	24.6	18	29.4	40	35	34	34.5	27	37.5
	34	24.8	22	30	58	35.6	39	34.9	30	37.8
	45	25.1	26	31.2	69	36.1	42	35.2	36	38.8
	55	25.3	30	32.5	80	36.2	50	36.1	42	39
	65	26.2	40	33.6	110	36.8	60	37.3	50	39.6

注：上表是不同装药量，在不同时间的膨胀压力

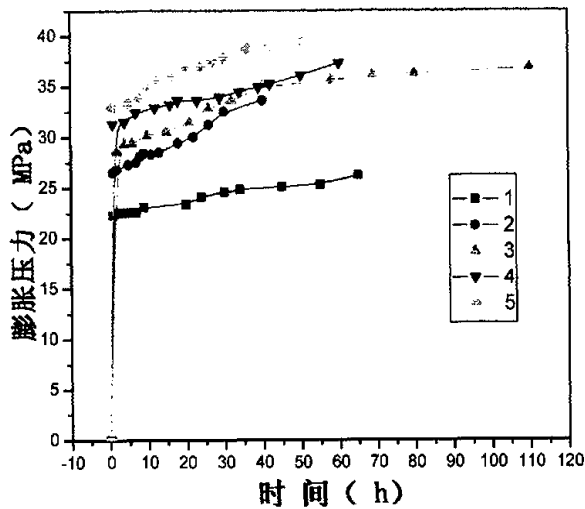


图 3.3 药量与膨胀压的关系图

3.3.1.3 不同静态破碎剂的膨胀压力对比

测试样品 6 为新研制开发的静态破碎剂，样品 7 和样品 8 为两种普通静态破碎剂，药量都为 200 克，测试结果如表 3-4 所示，绘制成膨胀压力—时间关系曲线如图 3.4 所示。

表 3—4 研制开发的静态破碎剂和市售产品膨胀压力测试结果

样品	6		7		8	
药量	200g		200g		200g	
	时 间 (h)	压 力 MPa	时 间 (h)	压 力 MPa	时 间 (h)	压 力 MPa
测 试 结 果	1	22.4	1	8.9	1	12.6
	3	26.3	4	9.6	4	12.9
	5	28.9	7	9.9	7	13.5
	11	29.2	10	10.5	10	14.8
	14	30.2	11	11.6	11	16.6
	22	31.6	12	12.8	12	16.8
	26	31.8	14	13.5	14	17.8
	33	32.9	18	15.2	18	17.9
	44	35.3	24	17.2	24	19.8
	54	35.6	29	17.5	29	20.1
	69	36.3	32	17.8	32	20.4
	74	36.5	43	18.1	43	20.7
	96	36.7	56	18.5	56	21.1

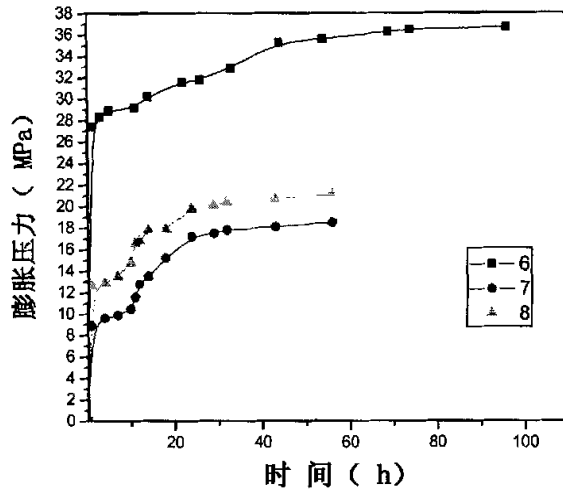


图 3.4 不同静态破碎剂的膨胀压力对比图

从图 3.4 中可以看出，在相同条件下，所开发的静态破碎剂的膨胀压力比普通静态破碎剂膨胀压力高，达到近 40MPa。另外，所开发的静态破碎剂的反应速度也

比普通静态破碎剂快，只需 7 小时就能达到较高膨胀压力，而普通静态破碎剂则需要 30 小时以上。

3.3.2 耐候性能测试

为了了解所研制的静态破碎剂的耐候性能及环境温度对静态破碎剂膨胀压力的影响，分别在春季、夏季和冬季对同种静态破碎剂进行了膨胀压力测试，测试结果如表 3-5（三种试样为同种所开发的静态破碎剂）。

表 3-5 不同环境温度下静态破碎剂的膨胀压力

春、秋 (15℃)	反应时间 (分钟)	30	60	90	120	150	240	330	480	600	660	720
	膨胀压力 (MPa)	8	25	33.6	36.2	36.5	37	37.5	37.9	38	38.9	40.3
夏 (30℃)	反应时间 (分钟)	20	35	40	45	50	55	60	70	120	240	480
	膨胀压力 (MPa)	9.5	16.5	18	19.5	26.4	30	36.3	36.5	37	37.6	38.8
冬 (0℃ 空调 控温)	反应时间 (分钟)	40	50	60	90	180	240	390	540	600	660	900
	膨胀压力 (MPa)	10.2	18.6	23	30.7	30.8	31	31.5	31.6	32	32.4	32.7

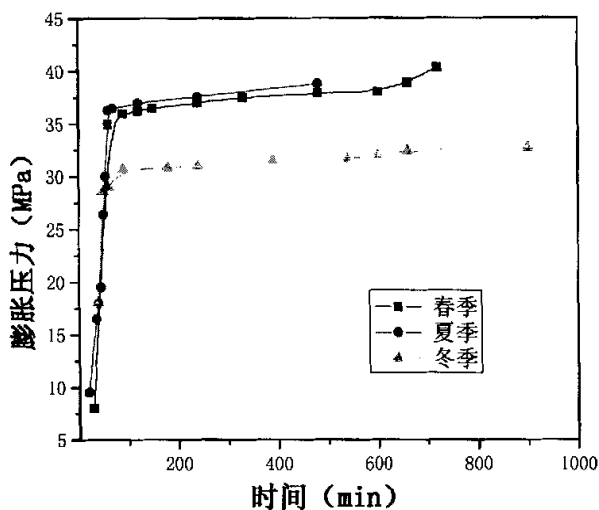


图 3.5 静态破碎剂的耐候性能

把以上数据绘成膨胀压力—时间关系曲线如图 3.5 所示，从图中可以看出，所研制的静态破碎剂的耐候性较好，其膨胀压力随气温变化不大，由于测试的样品采用的是同一批号静态破碎剂，测试的时间有一定跨度，静态破碎剂在存放过程中性

质发生变化以及测试系统的灵敏度、准确度有可能发生改变，因此，实验结果不是很具有说服力。根据我们的经验及一些测试结果发现，静态破碎剂的存放时间越长，其反应速度越快，膨胀压力越小。从图 3.5 中也有所反映，静态破碎剂的反应速度及膨胀压力与其存放的时间有关系，有待于做进一步的研究。如果条件允许，能够控制室温的话，静态破碎剂的耐候性能将更准确，更具有说服力。

3.3.3 分析与思考

从图 3.3 可以看出，随着药量的增大，静态破碎剂的膨胀压力也不断增大，这是显而易见的。参加反应的静态破碎剂的药量越多，其产生的体积膨胀也越大，因而，膨胀压力也越高。这就说明了为什么采用大孔径的装药孔更容易破碎混凝土、岩石的现象。因此，在实际工作中应尽可能使用大直径的孔进行静态破碎。但同时也要注意冲孔问题，孔径越大越容易发生冲孔现象。

图 3.5 表明，环境温度越高，静态破碎剂产生的膨胀压力越大，反应速度也越快。这可用静态破碎剂的反应特点来解释，静态破碎剂的反应过程按其内部温度的变化分为潜伏期、快速上升期、恒温期、继续上升期和温度下降期。其中，快速上升期是最重要的一个阶段，只要反应到了快速上升期，静态破碎剂的膨胀压力就能持续上升。因而，从潜伏期到快速上升期时间的长短，决定了静态破碎剂反应速度的快慢。静态破碎剂开始水化反应时，即进入潜伏期，并放出热量。当热量聚集到一定程度，放出的热量大于消散于环境的热量时，即进入快速上升期。温度迅速增高，分子运动强烈，反应加快，释放更多的能量。因而，氢氧化钙源源不断地析出，体积迅速膨胀。因此，环境温度越高，越有利于热量的聚集。使反应迅速进入快速上升期，反应速度加快；环境温度低，使热量容易消散，减缓了反应进入快速上升期，因而反应速度变慢。

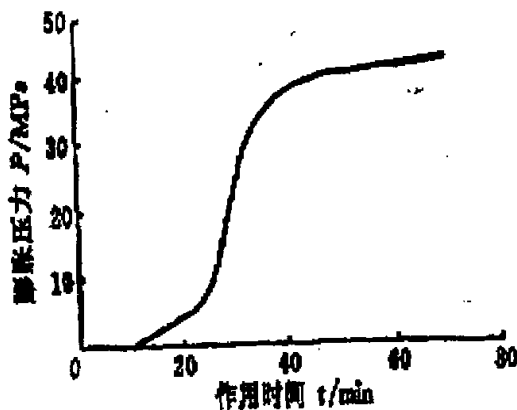


图 3.6 静态破碎剂的膨胀压力与时间的关系

图 3.6 表示出了静态破碎剂的膨胀压力与时间的关系, 测量时尽管时间很长, 静态破碎剂的膨胀压力仍然一直在缓慢增长。这说明静态破碎剂在破碎施工中剩余能量较多, 应考虑如何才能充分利用, 以节约能源。

3.4 混凝土和岩石开裂试验

在研究静态破碎剂的膨胀压力和反应速度的基础上, 对所开发静态破碎剂的破碎能力在混凝土和岩石上进行了实际试验。在试验时, 首先进行了小孔破混凝土和岩石试验。前面已述孔径越大, 其破碎能力就越强, 也就是说在孔径很小的情况下破碎困难。因此, 采用小孔径可更好地检验静态破碎剂的性能。在此基础上又进行了常规孔径的破碎试验。试验结果如下:

试验 1: 素混凝土试块 $45 \times 45 \times 30 \text{cm}$, 钻孔直径为 18mm , 孔深为 23cm , 钻孔数量为 3 个, 然后把静态破碎剂装入孔中。5 小时出现裂缝, 7 小时完全破裂。在同一试块上钻相同数量孔, 而孔径为 14mm 进行试验, 12 小时出现裂缝。静态破碎剂的破碎效果图如图 3.7 所示 (孔径为 18mm)。

试验 2: 试块为直径为 35cm , 高为 26cm 的素混凝土, 钻孔直径为 25mm , 孔深为 21.5cm , 钻孔数量为中心一个。6 小时出现裂缝, 10 小时完全破裂。破碎情况见图 3.8 所示。

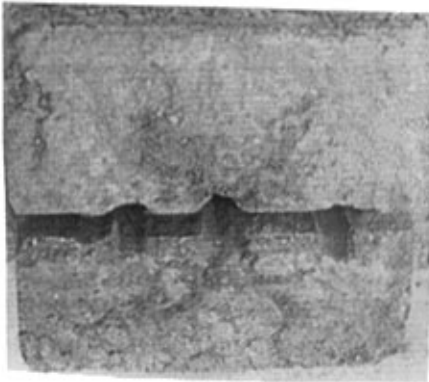


图 3.7 试验 1 破碎效果图

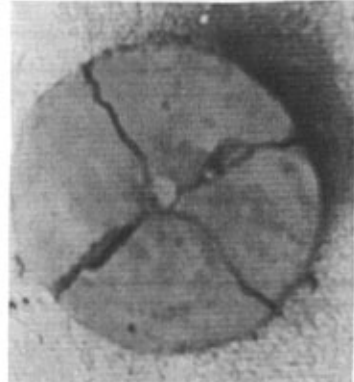


图 3.8 试验 2 破碎效果图

试验 3: 白云质灰岩试块 $120 \times 55 \times 38 \text{cm}$, 钻孔直径为 35mm , 孔深为 30cm , 钻孔数量为 5 个, 然后把静态破碎剂装入孔中。3 小时出现裂缝, 具体布置及试验效果见图 3.9 所示。

试验 4: 白云质灰岩试块 $120 \times 55 \times 38 \text{cm}$, 钻孔直径为 35mm , 孔深为 30cm , 钻孔数量为 3 个, 然后把静态破碎剂装入孔中。8 小时出现裂缝, 具体布置及试验效果见图 3.10 所示。

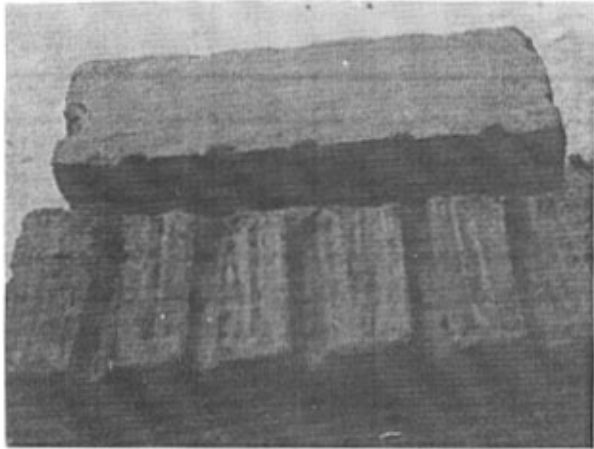


图 3.9 试验 3 破碎效果图

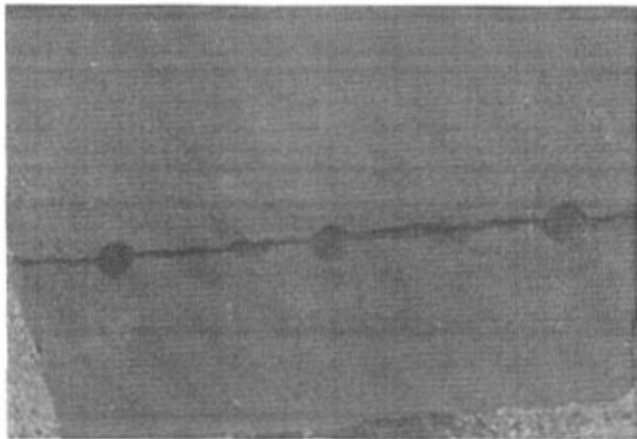


图 3.10 试验 4 破碎效果图

试验 5: 花岗岩试块 $70 \times 60 \times 40 \text{cm}$ ，钻孔直径为 30mm ，空深为 32cm ，钻孔数量为两个，然后把静态破碎剂装入孔中。9 小时出现裂缝，具体布置及试验效果见图 3.11 所示：

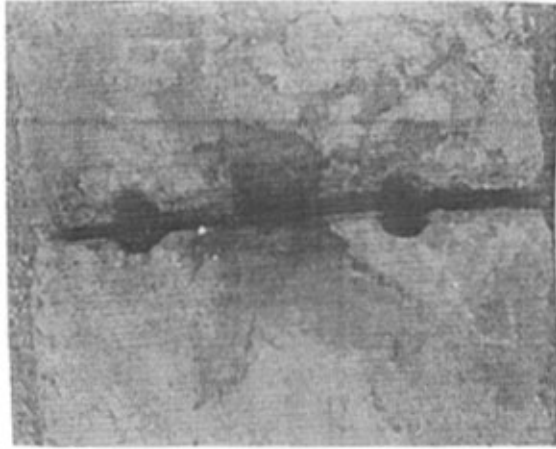


图 3.11 试验 5 破碎效果图

对照：同一试块钻相同规格的孔 2 个，采用市售静态破碎剂产品 20 小时才出现微小裂缝。

把上述新研制的静态破碎剂开裂试验与出现裂缝的时间比较。采用相同的孔径，布孔数越多，其所需要的开裂时间越短，孔径增大，其膨胀压力也增大，它们之间几乎成正比例关系。故工程中常采用增大孔径、减小孔间距来提高静态破碎剂的拆除能力。但从经济效益出发，应选取合理的孔径与孔间距。因为混凝土和岩石的破裂过程是一个裂隙发育及成长的缓慢过程，而不是瞬时完成的，故不能用传统的材料力学方法进行分析，而应引入断裂力学方法进行分析。

试验 6：花岗岩试块 $100 \times 70 \times 60 \text{cm}$ ，钻孔直径为 35mm ，空深为 50cm ，钻孔数量为 3 个，然后把静态破碎剂装入孔中。2 小时出现裂缝，具体布置如图 3.12 所示：

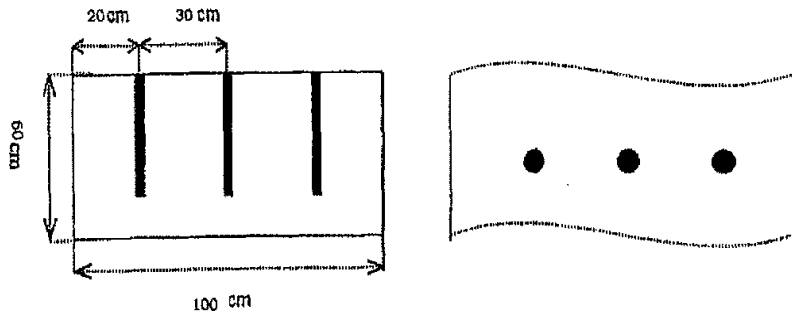


图 3.12 试验 6 布置方案图

试验 7：花岗岩试块 $100 \times 70 \times 60 \text{cm}$ ，钻孔直径为 35mm ，空深为 50cm ，钻孔数量为 2 个，然后把静态破碎剂装入孔中。18 小时出现裂缝，具体布置如图 3.12 所示：

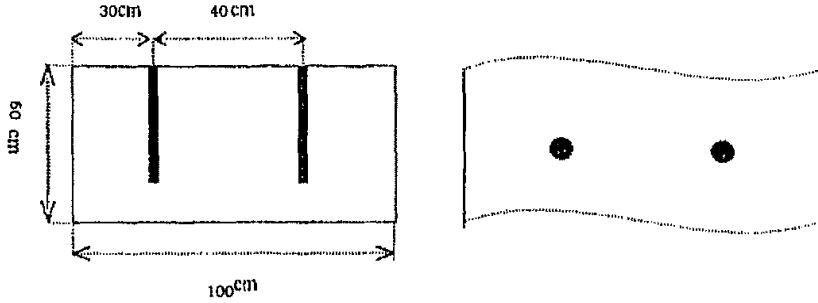


图 3.13 试验 7 布置方案图

由图 3.12 和图 3.13 可以看出, 采用相同的孔径, 孔径数量多, 其膨胀压力分布均匀, 膨胀压力也增大。当孔径数量增加一个, 其破碎时间相对缩短很多。但是从经济效益出发, 应选取合理的孔数量、孔径与间距。

从试验结果可以看出, 与普通静态破碎剂相比, 所开发的静态破碎剂膨胀压力大, 反应速度快。普通市售静态破碎剂在花岗岩上采用 5 个孔进行开裂也比较困难, 而所开发的静态破碎剂采用 3 个孔, 开裂时比其采用 5 个孔还短。

从试验结果还可以看出, 在同一试块上进行的开裂实验, 同样孔数时, 孔径大的开裂时间短; 在同一规格的岩石上进行开裂, 孔数多的比孔数少的开裂时间短, 也就是说孔间距大到一定距离时, 岩石开裂就变得相当困难。有时需要几天以上的时间才能开裂。这说明静态破碎剂的膨胀压是有限的。所以, 静态破碎剂一般用于混凝土及岩石的破碎。

在所有试验中均未出现冲孔现象, 操作方便, 也没有出现失去作用而不能开裂的情况。

3.5 本章小节

膨胀压力是各种静态破碎剂最主要的性能指标, 而膨胀压力测试是静态破碎剂研制过程中一个不可缺少的环节和重要手段。液压式平衡测压仪是我们选用的静态破碎剂的测压法。它具有操作简单, 环境温度可控, 数据复现性好, 节约钢材等优点。测量结果非常令人满意。通过分析测得的膨胀压力数据, 得出以下结论:

- (1) 静态破碎剂的水灰比越小, 其膨胀压力也就越大。
- (2) 静态破碎剂的装药量大, 其膨胀压力也就越大。这就说明了为什么采用大孔径药孔更容易破碎混凝土、岩石。
- (3) 静态破碎剂破碎的温度越高, 其膨胀压力也就越大。反应速度也就越快。
- (4) 所开发的静态破碎剂的耐候性好, 四季都可以用。
- (5) 所开发的静态破碎剂所能达到的最大膨胀压力为市场同类产品的两倍左

右，这大大提高了静态破碎剂的破碎能力，扩大了其应用范围。

(6) 混凝土、岩石的开裂实验表明，所开发的静态破碎剂的膨胀压力大，而且它的反应速度也非常快。

(7) 所研制开发的静态破碎剂无冲孔现象的发生，具有操作简单和安全的特点。

4 静态破碎剂在工程中的应用

4.1 前言

静态破碎技术可在无震动,无飞石,无噪音和无毒气污染的条件破碎或切割混凝土构筑物或岩石,特别适用于老厂改造和房屋拆迁工程。对于岩石的破碎和切割,不会造成石材的内伤,提高了成材率。破碎时不会损坏周围的任何物体,又能达到破碎的目的,由于静态破碎具有上述独特的优点,因而它具有广泛的发展前景。

4.2 静态破碎剂在混凝土和钢筋混凝土拆除中的应用

4.2.1 混凝土拆除的范围

(1) 不允许和不适宜使用炸药爆破和机械破碎施工的条件下,需要拆除的混凝土工程,如禁止出现燃点、明火和高温的储油罐、储气罐、油气管线、炸药库、危险品仓库、军火库旁的破碎拆除施工;不允许和不适宜出现飞石的铁路复线、高压输电线、通讯光缆旁施工、机关学校、公共场所及密集民宅旁的破碎施工;不允许和不适宜出现强烈震动的破碎施工,如建筑物保留拆除、边坡险情处理、文物抢救保护工程、不允许和不适宜出现巨大声响和噪声的破碎施工;如城市深夜的破碎施工等。

(2) 城市建筑、大型设备混凝土基础拆除,水利、路桥及隧道等工程需要“静态爆破法”破碎施工的工程。保留部分混凝土完整性和结构强度要求不能受到任何损害的破碎拆除。

(3) 欠挖处理及开挖和支护要求同时进行的边坡处理工程。

(4) 控制爆破前的预裂^[17]。

4.2.2 混凝土破碎钻孔布置

在破碎设计之前,应先了解破碎对象有无钢筋,钢筋的直径和分布情况;有无埋设角钢,钢管等异型钢件;观察被破碎部位与周围结构的联结情况和本身几何尺寸形状;根据搬运条件、要求破碎的块度等,然后进行布孔设计。

(1) 最小抵抗线 W

最小抵抗线是孔径的外缘到自由面的最小距离。根据破碎对象的几何形状、配筋情况和块度要求;无筋和少筋混凝土 W 为 30—40cm;钢筋混凝土 W 为 20—30cm。

(2) 孔距和排距

孔距和排距的选取,主要取决于混凝土强度,含筋率和破碎剂块度的要求。

孔距 a: 一般 $a = (1.2 \sim 1.5) W$ 。对于无筋混凝土 $a = 40 \sim 60 \text{cm}$, 对于钢筋混凝土, $a = 15 \sim 30 \text{cm}$;

排距 b: 当要求多排孔分次破碎时, 建议 $b = (0.6 \sim 0.9) a$, 宜采取梅花形布孔, 破碎体自由面少, b 取小值, 自由面多, b 取大值。

(3) 钻孔直径 D

孔径是决定静态破碎剂破碎率的重要因素, 孔径 D 较大, 静态破碎剂用量多, 破碎效果好。但是由于静态破碎剂水化时放热, 当其温度达到 100°C 时, 静态破碎剂易发生喷孔, 故在一般情况下, 建议 $D = 25 \sim 55 \text{mm}$, 比较安全和经济合理。

(4) 孔深 L

孔深大小主要取决于设计的破碎高度 H 和钢筋的约束程度。建议: 无筋或少筋混凝土, $L = (0.75 \sim 0.8) H$; 钢筋混凝土 $L = (0.95 \sim 1.0) H$ 。

(5) 钻孔方向

根据混凝土构筑物的结构状况, 一般情况尽可能钻垂直孔, 从而使钻孔和填充静态破碎剂均较方便^[17]。

4.2.3 静态破碎剂使用量估算方法

静态破碎剂使用量计算式为: $Q = \pi r^2 L K$ 。式中: Q 为 1m^3 钻孔 SCA 理论用量 (kg), 使用时另计损耗 (5~10)%; r 为钻孔半径 (m); L 为钻孔深度; K 为 1m^3 静态破碎剂重量 (kg/m^3)。

4.2.4 安全措施和注意事项

(1) 无关人员不得进入施工现场。

(2) 使用静态破碎剂必须配戴防护眼镜 (防尘防冲击型 PVC 护目镜)。施工人员未戴防护眼镜操作属安全违章。

发生冲孔是正常现象, 也是不可预见和不可完全控制的现象。冲孔产生的原因较多, 大致有以下几种: ①操作人员操作不当。包括药剂已经发热冒气仍在灌装等, 装填不密实有空气隔层等; ②温度控制不当。气温高时, 拌和水、药剂、钻孔孔壁温度控制不当、抑制剂药量不够, 致使药剂反应过快等; ③布孔设计不当。孔距及抵抗线过大、孔壁光滑等; ④钻头选用不当。钻孔直径过大等。冲孔时药剂温度较高且有腐蚀性, 冲入眼内可能会对角膜造成严重损害。为防止伤人事故, 操作人员必须戴符合国家安全标准生产的防冲击防尘 PVC 护目镜进行操作。

(3) 在药剂灌入钻孔到岩石或混凝土开裂前, 不可将面部直接近距离面对已装药的钻孔。药剂灌装完成后, 盖上麻袋或棕垫, 远离装灌点。观察裂隙发展情况时应更加小心。此外施工现场应专门备好清水和毛巾, 冲孔时如药剂溅入眼内和皮肤

上，应立即用清水冲洗。情况严重者立即送医院清洗治疗。

(4) 严禁擅自在破碎剂中加入其他任何化学物品。

(5) 严禁将破碎剂加水后装入小孔容器内（如啤酒瓶等），否则非常危险。

(6) 刚钻完孔和刚冲孔的钻孔，孔壁温度较高，应确定温度正常符合要求并清洗干净后才能继续装药。

(7) 静态破碎剂在存放中应防潮。开封后请立即使用。如一次未使用完，应立即紧扎袋口，需用时再开封。

4.2.5 施工实例

在对西安某厂两座大型试车平台拆除时，成功地使用了静态破碎法。该试车平台高3米、宽4米、长8米。在静态爆破设计时，进行了试爆，分别按35mm、40mm、45mm等不同孔径布置了三组孔眼，试爆效果见表4-1、表4-2。

表 4-1 三组试爆效果比较

组别	布孔方式	设定参数	检查项目		
			开裂时间 h	裂纹效果	耗药量
1	梅花形	L=0.8H a=35cm	16—20	明显效果好	大
2	方格形	L=0.8H a=40cm	18—20	明显未贯通	最少
3	梅花形	L=0.8H a=50cm	16—20	明显效果好	少

表 4-2 不同孔径试爆效果对比

孔径 / mm	开裂时间 h	裂纹效果	耗药量
35mm	20	较差	少
40mm	18	较好	一般
45mm	18	较好	较多

根据试爆结果比较和现场施工条件，确定钻孔参数：孔径40mm、孔深0.8H、抵抗线30cm。其次，根据试车平台的结构特点，分别进行了不同的布孔：在靠近钢筋层处钻孔，把混凝土保护层胀裂露出钢筋后，用电气焊切割钢筋，解除约束后，再采用平行方格布孔，每孔药量参照经验参数和试爆情况取1.6kg，单位体积耗药量为 $20.8\text{kg}/\text{m}^3$ 。在8天内先后对两座试车平台进行了拆除，对周围环境及设施未产生任何影响，取得了较好效果，为技改项目的实施赢得了时间。

4.3 静态破碎剂在石方爆破施工中的应用

岩石的破碎首先要了解山体的地质构造、岩质及节理发育情况，岩石的抗压强度和抗拉强度，然后确定破碎时最小抵抗线、孔距、孔深、钻孔方向以及钻孔的布置。

4.3.1 岩石破碎的适用范围

(1) 护坡工程的岩石破碎，普通岩石的破碎和松动，大尺寸竖井，抗滑桩，孔桩的开挖，沟槽沉井的开凿

(2) 岩石的小切割和岩石的二次破碎，

(3) 道路扩宽工程和建房地基岩石的破碎，

(4) 大理石，花岗岩，汉白玉等贵重石料的切割。

4.3.2 破碎及钻孔的设计

岩石的破碎设计，首先要了解山体的地质构造、岩质及节理发育状况（倾斜角度），岩石的抗压强度和抗拉强度，然后确定破碎时的最小抵抗线 w ，孔距和排距，孔径，空深，钻孔方向和钻孔布置。根据施工取得的经验，各种参数一般估计值如下：

(1) 最小抵抗线 w ，

根据岩石的形状，节理，钻孔孔径和要求，破碎的块度等因素来确定，一般取值为：

破碎软质岩石： $W = 40\text{cm} \sim 60\text{cm}$

破碎中硬质岩石： $W = 30\text{cm} \sim 40\text{cm}$

(2) 孔距 a 和排距 b

岩石破碎块度较小时， w ， a ， b 均取小值，相反，取大值，一般取值为：

破碎软质岩石： $a = 40\text{cm} \sim 60\text{cm}$ ，

破碎中硬质岩石： $a = 30\text{cm} \sim 50\text{cm}$ ，

排距 b 应根据岩体的自由面多少决定。自由面多， b 取较大值，反之， b 取较小值。多排孔分次破碎时， b 一般为 $(0.6 \sim 0.9)a$ 。多排孔宜采用梅花形布孔。

(3) 孔径 D

孔径是决定静态破碎剂破碎效率的重要因素。孔径 D 取值越大，静态破碎剂装药量多，产生的膨胀压较大，其破碎效果较高。所以，一般孔径不宜小于 20mm ，但不宜大于 50mm 。

(4) 孔深 L

孔深大小主要取决于破碎面的高度 H 和岩石的约束程度。所以，当设计破碎面

为岩石的节理面或断裂面时： $L = (0.9 \sim 1.05) H$ 。（ H 为设计破碎高度）。

对于岩体节理面不清楚时，除创造人工自由面外，因为静态破碎剂对孔底部分破坏困难，孔深要比设计深度大 $5\% H$ 。相反，对于孤石破碎，因它四面凌空， L 可为 H 的 80% 左右。

(5) 钻孔方向应与岩体的节理方向互相。其破碎效果最好，一般来说，尽可能钻垂直孔，如果岩石节理不清楚，则要破碎面上打水平孔或斜孔，再打垂直孔，分段切割或破碎，可达到最佳破碎效果。

(6) 钻孔布置

孤石：根据孤石的大小，形状和破碎块度，来调节静态破碎剂的用量。取值一般为： $D=30\text{mm} \sim 50\text{mm}$ ， $a=40\text{cm} \sim 60\text{mm}$ ， $L=0.8H$ 。

岩石切割：在有节理情况下，钻孔方向要与节理面垂直，对于远离自由面的应采取梅花形及在岩石破碎面的上面和侧面同时钻孔的形式进行破碎。在无节理面或节理面不清楚时，要在预定破碎面上钻水平孔，创造人工自由面，方可奏效，取值一般为：

$$D=30\text{mm} \sim 40\text{mm}, a=20\text{cm} \sim 40\text{cm}, L=(1.0 \sim 1.05) H$$

钻孔位置与裂纹形状：岩石钻孔灌入静态破碎剂后，裂纹一般是按邻近的孔首先联成线^[19]。

4.3.3 施工实例

(1) 概述

灌溉机井施工在水利工程中经常遇到，由于机井断面大，一般都大于 2m ，无法用钻孔机械进行井孔施工，只有采用人工开挖。灌溉机井施工中如果遇到坚硬岩石，靠人工施工非常困难，有时甚至无法保证正常施工。工程施工中一般不允许使用炸药进行爆破开挖，对于坚硬岩石也只在保证不影响整体性的前提下采用小药量进行控制爆破，以免爆破产生的强烈震动及冲击波等影响水井稳定性。

在临潼某灌溉机井开挖过程中，遇到了大块的中风化砂岩块石，最大块度超过 2m ，岩体坚固性较好，其普氏系数 F 为 $6 \sim 8$ ，人工开挖非常困难；基岩中有一厚层石英砂岩，岩体坚固性较好，普氏系数 F 为 10 ，岩体完整性好，基本未风化，无节理及裂隙，用人工方法无法进行正常施工。由于考虑机井的整体性，不允许采用爆破方法进行施工，为保证施工安全，在机井施工中采用了静态破碎技术进行坚硬岩石的破碎，效果较好。

(2) 静态破碎方案及参数设计

由于碎石土中的砂岩块石，最大块度超过 2m ，而且岩体坚固性较好，其普氏系数 F 为 $6 \sim 8$ ；基岩中的厚层石英砂岩，岩体坚固性较好，普氏系数 F 为 10 ，岩体

完整性好,基本未风化,无节理及裂隙,而且在开挖过程中只有一个自由面,因此,必须选用能提供较大膨胀压力的静态破碎剂,所开发的静态破碎剂膨胀压力大,反应速度快,安全性好。

(3) 钻孔布置设计

对于静态破碎,临空面(自由面)越多,单位破石量就越大,经济效益也就越好。由于机井开挖时只有一个临空面,因此在对井中块石及基岩破碎前应尽可能多地创造临空面。

由于块石块度大小不一,对于块度小于井孔的块石,要尽量将块石周围的土层全部剥开,将整个块石暴露出来,以增加临空面,钻孔按十字网格状布置,采用垂直孔钻穿整个块石,同一排钻孔要布置在同一平面上,并尽可能地与临空面平行,在装药时按“先四周,后中央”的顺序进行全孔长灌注。

对于长宽两个方向块度都大于机井的块石,钻孔按十字网格状布置,对于深度超过2m的块石采用分次破碎,每次破碎进尺60cm;深度方向小于2m的,采用垂直孔钻穿整个块石,同一排钻孔要布置在同一平面上,在装药时按“先四周,后中央”的顺序进行全孔长灌注。

对于基岩的破碎,先在中间钻两排密集垂直孔,装药破碎后将碎石掏出,形成槽形空间,增加临空面,以方便两侧岩体的破碎;然后再钻周边孔及辅助破碎孔,周边孔采用斜孔,孔口距开挖轮廓线5cm,孔底落在开挖轮廓线上;辅助破碎孔采用垂直孔;同一排钻孔要布置在同一平面上,装药时全孔长灌注,先装辅助破碎孔,再装周边孔。

(4) 钻孔参数设计

孔距与排距的设计

孔距与排距的大小与岩石硬度有直接关系,硬度越大,孔距和排距越小,反之则大;孔距与排距的大小与岩石破碎效果及施工成本有直接关系,孔距和排距越大,破碎效果越差,成本越低,孔距和排距越小,破碎效果越好,但是成本越高,因此要通过现场试验确定适宜的破碎参数。孔距与排距布置的经验值见表4—3所示。

通过现场试验,确定的静态破碎参数如下:

当砂岩岩块(普氏系数F为6~8)块度小于机井孔径的时候,孔距采用40cm;排距采用50cm。当砂岩岩块块度大于机井孔径的时候,外圈孔与次圈孔排距35cm;内圈孔与次圈孔排距40cm;外圈孔四个角孔与相邻孔的孔距为35cm,其余外圈孔的孔距为40cm;次圈孔及内圈孔的孔距40cm。石英砂岩(普氏系数F为10)的掏槽孔孔距与排距均为20cm;掏槽孔与辅助破碎孔排距为40cm;辅助破碎孔与周边孔的排距为30cm;辅助破碎孔与周边孔中间两个孔的孔距为40cm,其余孔距为30cm。

表 4-3 钻孔孔距与排距经验值

岩石硬度	F=4	F=6	F=8	F=10
孔距 (cm)	50--100	40	30	20
排距 (cm)	80	50	40	30

钻孔孔径的设计

钻孔直径与破碎效果有直接关系，钻孔过小，不利于药剂充分发挥效力；钻孔太大，易冲孔，也不经济。根据我国目前静态破碎的经验，钻孔孔径选为 40mm。

钻孔深度和装药深度的设计

砂岩岩块块度小于机井孔径的，钻孔钻穿整个块石。砂岩岩块块度大于机井孔径的，对于深度超过 2m 的块石采用分次破碎，每次破碎进尺 60cm；深度方向小于 2m 的，采用垂直孔钻穿整个块石。石英砂岩中钻孔深度 85cm，每次破碎进尺 80cm。

将静态破碎剂直接装至孔口，全孔长装药。

配浆和装药的设计

将钻孔内余水和余渣用高压风吹洗干净，孔口旁清理干净至无土石渣后将药剂加 30%左右的水（重量比）拌成流质状（充分搅拌后略有水），迅速倒入孔内并用略小于钻孔的捅杆捣实捅紧。

岩石开裂后，立即向裂缝中加水，以支持药剂持续反应。

采用这种施工方法，用两天完成破碎石方任务，在施工中未出现任何事故，有力地保障了施工进度，取得了良好的经济和社会效益。

4.4 本章小节

(1) 静态静态爆破技术可以在无振动，无污染，不影响周围建筑结构的情况下对地基或建筑物实施爆破，即安全，又大量节省人力，工期，材料。因而，在不适用炸药爆破环境条件下及其他安全要求高的敏感区，更显其优越性。

(2) 静态破碎时应注意其适用性，对于抗拉强度特别大的岩石或抗拉强度较大的钢筋混凝土。静态破碎不明显。

(3) 通过施工实例得出：对素混凝土和岩石采用静态破碎，效果比较理想。

5 结论和尚需深入开展的工作

5.1 结论

通过本文试验研究可得出如下结论:

(1) 优化了静态破碎剂配方,可以在最佳配方(见下表 5-1)条件下得到性能进一步提高的静态破碎剂。

表 5-1 静态破碎剂最佳配方

因素	生石灰	P.O42.5R 水泥	石膏	减水剂	粉煤灰	钠基膨润土
参数	70%	10%	3%	1%	13%	3%

(2) 研制出的静态破碎剂反应速度快,一般数小时就可使混凝土,岩石开裂,大大缩短了混凝土及岩石的破碎等待时间,加快了施工进度,提高了施工效率。

(3) 研制出的静态破碎剂膨胀压力大,所以大大提高了其破碎能力,扩大了静态破碎剂的使用范围。

(4) 所开发的静态破碎剂在使用过程中安全可靠,不发生冲孔现象,解决了以往静态破碎剂不安全问题。

(5) 所开发的静态破碎剂为四季通用型,给施工、储存带来了方便。

(6) 所开发的静态破碎剂使用方便,操作简单。

(7) 采用液压式测膨胀压装置,具有操作简单方便,读数直观准确等优点,很有推广价值。

(8) 通过对静态破碎剂在工程中应用,所研制开发的静态破碎剂破碎性能好,施工简单方便,安全性好。

所以说,所开发的静态破碎剂的研制成功,解决了以往破碎剂不能解决的膨胀压力小,反应速度慢等问题,大大提高了静态破碎剂破碎能力和使用范围,使我国在静态破碎剂研究方面又有了新的发展,对于保护环境具有重大意义。同时,成本低,性能优异。对于节约能源,提高经济效益具有重要意义。

5.2 尚需深入开展的工作

静态破碎剂的合成仍有大量的工作要做。

(1) 静态破碎剂所存在的问题主要是膨胀压力和反应速度以及生产成本问题。经实际实验研究,取得了一定的进展,但还需要进一步研究使其更易推广应用。

(2) 液压式平衡测压法是一种简单、直观、可靠的测压新方法,仪器可以反

复使用。但还需进一步研究其灵敏度、误差修正及泄漏等问题。

(3) 改进试验方法和试验条件, 进一步研究静态破碎剂的性能与存放时间的关系。

(4) 对静态破碎剂的混凝土和岩石破碎机理还需进一步研究。引入断裂力学和损伤力学知识, 对静态破碎剂的破碎机理进行研究, 以确定静态破碎剂的施工参数, 提高施工的控制能力, 提高经济效益。

(5) 在人们对环保问题越来越重视的今天, 在城市高速发展中, 静态爆破具有很大的发展及应用前景。但是目前对静态爆破的研究和发展任务还很重, 一些因素的制约, 还使其适应性和综合经济性不够理想。所以, 对静态爆破还需不断地探索、总结, 积极推动其发展, 以适应都市的需要。

综上所述, 要更清晰地了解静态破碎剂的各项性能和破碎机理, 都有待于未来的研究。

致 谢

本论文是在导师何廷树教授的悉心指导下完成的。这三年来，导师在学习和生活上给我很大的帮助，从课题工作的开始到实验过程、论文成文的审阅，倾注了导师极大的心血。何老师和蔼可亲、谦和宽容的待人态度；丰富的理论知识、敏锐的学术思想；严谨的治学作风以及执着的敬业精神给作者留下了深刻的印象。作者在学习方法、生活方式等方面得到了导师的精深指导和莫大的关怀，感到受益匪浅。值此论文完成之际，我真诚地向何老师表示衷心地感谢和美好的祝愿！

特别感谢建材所王福川教授在作者平日学习、日常生活、课题研究及论文审阅方面给予的指导、关心、和启迪！

非常感谢建材所尚建丽教授、张林绪高级工程师及宋学风、伍勇华等老师在课题思路、试验器材等方面的启发和支持！

感谢建材所全体老师、全体研究生以及所有支持作者的亲朋好友！

感谢百忙中参加论文评审及莅临答辩的各位专家、老师！

感谢母校—西安建筑科技大学！

最后，真诚感谢我的家人对我的大力支持！

作 者

2005年5月

参考文献

- [1] 何廷树. 混凝土外加剂. 第一版. 陕西科学技术出版社, 2003. P121~129
- [2] 陈建奎. 混凝土外加剂的原理及应用. 中国计划出版社, 1997. P11~70
- [3] 许宁. 新型静态破碎剂试验研究. 第四届全国岩石破碎学术讨论会论文集. 第四届全面岩石破碎学术讨论会. 4.1989-11
- [4] 王殿福, 翟美林, 陈大清等. 静态膨胀破碎剂的发展概况. 爆破器材应用学术交流会文章汇编. 爆破器材应用学术交流会. 1986-06
- [5] 高荣庆. 关于静态破碎剂的喷料问题. 爆破器材应用学术交流会. 1986-06 文章汇编. 爆破器材学术交流会. 1986-06
- [6] 马志钢, 王瑾. 试论静态破碎剂及其性能改进. 煤矿爆破. 2002.00 (001) P4~5
- [7] 郭瑞平, 杨永琦. 静态破碎剂膨胀机理及可控性的研究. 煤炭学报. Vol. 19. No. 5. 1994.
- [8] 刘清荣, 巴惠鹏. 静态破碎剂研究现状与展望. 献给静态破碎剂问世十周年. 爆破. 1990.007 (001). P1~10
- [9] 戴丽荣, 李庆宁. 静态破碎剂膨胀压测定方法的研究. 武汉工业大学学报. 1989. 001 (002). P131~135
- [10] Hassock; Fukui, static demolition by calcium oxide. Journal of the Japan Explosives society. Vol. 62. No.5. 2001. P225~232
- [11] His a kaki Fukui, Toshiyuki Natasha, static demolition by calcium oxide(IV)-Thermal decomposition of calcium carbonate. Journal of the Japan Explosives society vol. . 62. No.1. 2001. P39~47
- [12] G. P. A. G. Van Zijl, The time scale in quasi-static fracture of cementations materials. International conference on structwal Engineering. Mechanics and computation. Arp 2-4. 2001. Cape Town. south Africa. 2001. Vol. 1. P729~736
- [13] 林传仙等编. 矿物及有关化学热力学数据手册. 科学出版社, 1985 P5~28
- [14] 魏承景. 静态破碎技术. 广西科学技术出版社, 1989. P1~7
- [15] 李永乐. 应用数理统计. 长沙国防科学大学出版社, 1997. P235~262
- [16] 汪荣鑫. 数理统计. 第十二版. 西安. 西安交通大学出版社, 2004.4. P150~160
- [17] 君国伟, 文香勇. 无声破碎剂在混凝土和钢筋混凝土拆除中的应用. 黑龙江水专学报. 2001.3. vol.28. No.1. P45~46
- [18] 彭继安, 黄志贤, 刘新社. 钢筋混凝土拱桥的静态爆破拆除. 石家庄铁道学院学报. 1993. 3. vol.12. No.1. P45~46

- [19] 朱辉. 无声破碎剂在石方爆破施工中的应用. 山西建筑. 2002.6. vol.28. No.6. P55~56
- [20] 张曼莉, 姚刚. 静态爆破的设计及应用. 建筑技术. 2002. vol.33. No.6. P420~422
- [21] 冯叔瑜, 朱忠节, 马乃耀著. 大量爆破设计及施工. 北京. 人民交通出版社., 1973. P50~70
- [22] 钟冬望. 爆破安全技术. 武汉. 武汉工业大学出版社, 1992. P10~40
- [23] 马晓明, 庞作良, 崔国印, 工程改建中的静态破碎技术, 东北水利水电.1998. 第11期. P7~8
- [24] 郭瑞平, 霍雷声. 静态控制破碎技术的研究. 控矿工程. 1998. 第1期. P54~56
- [25] 武永杰, 袁砚池, 任子龙. 拆除与加固在建筑工程中应用. 矿冶. 2002.3.vol.11. No.1. P86~88
- [26] Is mail Aide. Influence of time addition of superlas ticizers on the archeological properties of fresh cement pastes. Cement and concrete research. 2003.1
- [27] 孙训方, 方孝淑. 材料力学. 下册. 高等教育出版社, 1988. P5~25
- [28] 古远新. 静态破碎剂SCA在城市拆除工程中的应用. 地质勘探安全. 1998.No.2. P24~25
- [29] Yong sheng XU, Hongjie Li, Ximing Yuan, The study of the un deepwater static cracking Agent, Proceedings of the twenty-ninth Annual conference on explosives and blasting technique (volume I). 2003. P241~248
- [30] 龚有满, 马振宗, 王可钦. 柳江航道整治工程中的静态破碎试验研究. 水运工程. 1998. No.8. P8~10